



## Diplomarbeit

# Untersuchungen zum Betriebsverhalten von Biomeilern

Verfasserin

Nele Müller

angestrebter akademischer Grad

Diplom-Ingenieurin

Abgabedatum 23.11.2017

Studienrichtung: Diplom Verfahrenstechnik

Betreuer: Dr.-Ing. Joachim Brummack

Leiter FG Alternative & regenerative Ressourcen

Institut für Verfahrenstechnik und Umwelttechnik

Technische Universität Dresden

# Danksagung

Ich danke Dr. Joachim Brummack für die Möglichkeit, die Fragestellungen dieser Arbeit wissenschaftlich zu untersuchen. Durch seine fachliche Expertise und seine Erfahrungen am Versuchsfeld ist diese Arbeit überhaupt erst möglich geworden.

Weiterhin danken möchte ich Dipl.-Ing. Toni Rosemann und Dipl.-Ing. Uwe Jaschke für die fachlichen Anmerkungen und die Unterstützung.

Ich danke auch Dr. Torsten Schmidt-Baum und Dr. Walter Stinner vom DBFZ für die Projektkoordination und den fachlichen Austausch, sowie Heiner Cuhls, Max Koch und Hannes Jaschke für die sehr gute Zusammenarbeit am Versuchsfeld.

Großer Dank gebührt auch der Rosa-Luxemburg-Stiftung für die Unterstützung über all die Jahre hinweg.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Tabellen- und Abbildungsverzeichnis</b>	<b>8</b>
<b>Abkürzungen und Formelzeichen</b>	<b>12</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>15</b>
<b>2 Problemstellung und Zielsetzung</b>	<b>16</b>
<b>3 Grundlagen der Kompostierung</b>	<b>17</b>
3.1 Definition . . . . .	17
3.2 Mikroorganismen der Kompostierung . . . . .	17
3.3 Substrat . . . . .	18
3.3.1 Nährstoffe . . . . .	18
3.3.2 Wassergehalt . . . . .	18
3.3.3 Porengröße und Partikelgröße . . . . .	19
3.4 Temperatur, Kohlenstoffdioxid und Sauerstoff . . . . .	19
3.4.1 Zusammenhänge . . . . .	19
3.4.2 Hygienisierung . . . . .	20
3.4.3 Temperaturführung . . . . .	21
3.5 Belüftungsverfahren statischer Reaktoren . . . . .	21
3.5.1 Bedeutung . . . . .	21
3.5.2 Aktive Belüftungsverfahren . . . . .	21
3.5.3 Passive Belüftungsverfahren . . . . .	22
3.5.4 Dombelüftungsverfahren . . . . .	22
<b>4 Stand der Wissenschaft</b>	<b>24</b>
4.1 Theoretische Modellierung . . . . .	24
4.1.1 Allgemeines . . . . .	24
4.1.2 Thermodynamische Modellierung . . . . .	24
4.1.2.1 Wärmebilanz . . . . .	24
4.1.2.2 Speicherwärme und spezifische Wärmekapazität . . . . .	26
4.1.2.3 Wärmeübertragung . . . . .	26
4.1.2.4 Wärmeverlust . . . . .	27

4.1.3	Modellierung der Selbsterhitzung und Reaktionswärme . . . . .	27
4.1.3.1	Begriffsbestimmung . . . . .	27
4.1.3.2	Deterministisch geprägte Modelle . . . . .	28
4.1.3.3	Stöchiometrische Modelle mit Prozessgasen . . . . .	28
4.1.3.4	Abschätzung durch den Heizwert des Substrat . . . . .	28
4.1.3.5	Abschätzung durch die Heizwerte der Nährstoffe . . . . .	29
4.1.4	Modellierung des Wasserhaushalts . . . . .	29
4.2	Technologien zum Wärmeentzug aus der Kompostierung . . . . .	30
4.2.1	Möglichkeiten des Wärmeentzugs . . . . .	30
4.2.2	Steuerung der Prozesse . . . . .	32
4.2.2.1	Bedeutung . . . . .	32
4.2.2.2	Belüftung . . . . .	32
4.2.2.3	C:N-Verhältnis . . . . .	32
4.2.2.4	Temperaturführung . . . . .	32
4.2.3	Bestehende Verfahren zum Wärmeentzug aus der Kompostierung . . .	33
4.2.3.1	Kontinuierliche Verfahren . . . . .	33
4.2.3.2	Kurzzeit-Batch . . . . .	33
4.2.3.3	Langzeit-Batch . . . . .	33
4.3	Datengrundlage zur Wärmeleistung . . . . .	34
4.3.1	Ermittlung der Wärmeleistung . . . . .	34
4.3.2	Experimente und Fehleranalyse . . . . .	35
4.3.3	Datengrundlage . . . . .	35
4.4	Fazit . . . . .	36
<b>5</b>	<b>Methoden zur Vermessung der BM</b>	<b>38</b>
5.1	Versuch . . . . .	38
5.1.1	Versuchsfeld und Umgebungsbedingungen . . . . .	38
5.1.2	Aufbau und Betriebsweise der Biomeiler . . . . .	38
5.1.2.1	Aufbau und Sensorik . . . . .	38
5.1.2.2	Substratvorbereitung . . . . .	40
5.1.2.3	Steuerung des Wärmeentzugs . . . . .	40
5.1.3	Versuchszeitraum . . . . .	44
5.2	Messungen . . . . .	44
5.2.1	Charakterisierung des Substrats . . . . .	44
5.2.1.1	Probenahme und Messpunkte . . . . .	44
5.2.1.2	Schüttdichtemessung . . . . .	44
5.2.1.3	Laboruntersuchungen . . . . .	45
5.2.2	Temperaturmessungen . . . . .	46
5.2.2.1	Automatisierte Temperaturmessungen . . . . .	46
5.2.2.2	Manuelle Temperaturmessungen . . . . .	46

5.2.2.3	Messung der Oberflächentemperatur . . . . .	47
5.2.3	Volumenstrommessung im Heizkreislauf . . . . .	47
5.2.4	Messung der Gaszusammensetzung im Festbettreaktor . . . . .	47
5.2.5	Messung der Wetterdaten . . . . .	48
5.3	Messfehlerbetrachtung . . . . .	49
5.3.1	Nicht-quantifizierbare Fehlerquellen . . . . .	49
5.3.2	Quantifizierbare Fehlerquellen . . . . .	49
5.3.3	Auswertung der Fehler der manuellen Messungen . . . . .	49
5.4	Auswertungsverfahren . . . . .	51
5.4.1	Auswahl der Biomeiler . . . . .	51
5.4.2	Darstellung des vertikalen Profils . . . . .	51
5.4.3	Berechnung der Wärmeleistung . . . . .	51
<b>6</b>	<b>Auswertung</b>	<b>53</b>
6.1	Auswertung der Wetterdaten . . . . .	53
6.2	Charakterisierung des Substrats . . . . .	53
6.2.1	Schüttdichte . . . . .	54
6.2.2	Wassergehalt, Wärmekapazität und -leitfähigkeit . . . . .	54
6.2.3	C:N-Verhältnis und Heizwert . . . . .	55
6.2.4	Korngröße und $\phi$ TS . . . . .	55
6.2.5	Volumenschwund durch Setzung . . . . .	56
6.3	Untersuchung des horizontalen Profils . . . . .	56
6.4	Untersuchung des vertikalen Profils . . . . .	59
6.4.1	Annahmen und Begriffsbestimmung . . . . .	59
6.4.2	Profil der Schüttdichte und des Abbaugrads . . . . .	59
6.4.2.1	Schüttdichte . . . . .	59
6.4.2.2	Abbaugrad . . . . .	59
6.4.3	Profil der Gaszusammensetzung . . . . .	62
6.4.3.1	Gaskonzentrationen im Festbettreaktor . . . . .	62
6.4.3.2	Optischer Nachweis der Mikroorganismen . . . . .	65
6.4.4	Profil der Temperatur . . . . .	67
6.4.4.1	Temperaturfeld im Festbettreaktor . . . . .	67
6.4.4.2	Oberflächentemperatur . . . . .	68
6.5	Untersuchung der Reaktionswärme und des Wärmeentzugs . . . . .	70
6.5.1	Abhängigkeit von dem Biomeilervolumen . . . . .	70
6.5.2	Abhängigkeit von der Steuerung des Wärmeentzugs . . . . .	72
6.5.3	Auswertung der Wärmeleistung . . . . .	74
6.5.4	Identifikation von Einflussfaktoren . . . . .	77
6.5.4.1	Abhängigkeiten der Parameter . . . . .	77
6.5.4.2	Einfluss der Umgebungsbedingungen . . . . .	79

6.6	Ansatz zur Erweiterung eines Modells . . . . .	80
6.6.1	Auswahl des Modells . . . . .	80
6.6.2	Wärmebilanz . . . . .	80
6.6.3	Räumliche Verteilung der Zustandsgrößen . . . . .	81
6.6.4	Wärmeübertragung zum WÜ . . . . .	82
<b>7</b>	<b>Bewertung und Diskussion</b>	<b>84</b>
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>88</b>
<b>9</b>	<b>Ausblick</b>	<b>90</b>
	<b>Literatur</b>	<b>91</b>
	<b>Anhang</b>	<b>98</b>
<b>A</b>	<b>Daten</b>	<b>I</b>
A.1	Aufbau . . . . .	I
A.2	Rotationssymmetrie . . . . .	II
A.3	Vertikales Profil des Abbaugrads . . . . .	V
A.4	Vertikales Profil der Gaszusammensetzung . . . . .	VI
A.5	Oberflächentemperatur . . . . .	VIII
A.6	Temperaturverläufe Seiten- und Mittensensor . . . . .	X
A.7	Abbau . . . . .	XII
<b>B</b>	<b>Berechnungen</b>	<b>XIII</b>
B.1	Wetter . . . . .	XIII
B.2	Schüttdichte Substrat . . . . .	XIV
B.3	Trockensubstanz . . . . .	XV
B.4	Wasserzusatz und -gehalt . . . . .	XV
B.5	Korngröße und oTS des Substrats . . . . .	XVII
B.6	Korngröße und oTS der kompostierten Biomasse . . . . .	XVIII
B.7	Volumenschwund . . . . .	XVIII
B.8	Rotationssymmetrie der Daten der Temperatursensoren . . . . .	XIX
B.9	Schüttdichtemessung Produkt . . . . .	XX
<b>C</b>	<b>Fehlerrechnungen</b>	<b>XXI</b>
C.1	Messmethode Schüttdichte Substrat . . . . .	XXI
C.2	Schüttdichte Substrat . . . . .	XXIII
C.3	Volumen Biomeiler . . . . .	XXIII
C.4	Trockensubstanz, Wasserzusatz und Wassergehalt . . . . .	XXIII
<b>D</b>	<b>Selbstständigkeitserklärung</b>	<b>XXV</b>

# Tabellenverzeichnis

3.1	Allgemeine Abbaubarkeit bestimmter Stoffgruppen [22] . . . . .	18
4.1	Heizwert, Massenanteil und Abbaugrad verschiedener Nährstoffe (Restabfall) [30]	29
4.2	Verfahren zum Wärmeentzug während der aeroben, thermophilen Prozessphase	34
4.3	Wärmeentzug bei der Kompostierung bestimmter Substratgruppen . . . . .	37
4.4	Substratparameter . . . . .	37
5.1	Übersicht der wichtigsten Bauteile . . . . .	42
5.2	Maße, Fertigstellung, Wasserzufuhr und Aufbaudetails aller Biomeiler . . . . .	42
5.3	Position der Temperatursensoren in den Biomeilern . . . . .	42
5.4	Quantifizierbare Fehler . . . . .	50
5.5	Messwertabhängige Fehlerabschätzung für Probevolumen für $h_m$ und $h_u$ bei Einstechtiefe $s \geq 1$ m, Grundlage für <u>Y</u> . . . . .	52
5.6	Fehlerabschätzung in Abhängigkeit von der Einstechtiefe $s$ , Grundlage für <u>Z</u> . . . . .	52
6.1	Wetterlage im Versuchszeitraum . . . . .	53
6.2	Parameter des Substrats . . . . .	54
6.3	Ergebnisse der Elementaranalyse . . . . .	55
6.4	Irrtumswahrscheinlichkeit $\alpha$ beim Seitenvergleich BM Gr. 2, manuelle Messung	57
6.5	Zonenspezifische Charakterisierung der kompostierten Biomasse . . . . .	60
6.6	Temperaturdifferenz der WÜ Schichten im Zeitraum $t_V$ 38 - 116 d . . . . .	72
6.7	Ähnlichkeit der schichtspezifischen Temperaturen von BM 2D und 2B mit WE	72
6.8	Wärmeleistung der Biomeiler in verschiedenen Versuchszeiträumen . . . . .	75
A.1	Vergleich Oberflächentemperatur: BM Gr. 2 . . . . .	VIII
A.2	Vergleich Oberflächentemperatur: Morgen und Abend . . . . .	VIII
A.3	Oberflächentemperatur im Zeitverlauf . . . . .	VIII
B.1	Auswertung Wetterdaten im Versuchszeitraum . . . . .	XIII
B.2	Messung der losen Schüttung $\varrho_S$ . . . . .	XIV
B.3	Messung der komprimierten Schüttung $\varrho_{SK}$ . . . . .	XV
B.4	Ermittlung der Trockensubstanz des gelieferten Substrats, 4.5.17 . . . . .	XV
B.5	Dokumentation Wasserzusatz . . . . .	XVI
B.6	Berechnung des Wasserzusatz und Wassergehalts mit Fehler . . . . .	XVI
B.7	Daten der Siebanalyse, 12.5.17 . . . . .	XVII

B.8	Berechnung der Korngrößenverteilung des Substrats . . . . .	XVII
B.9	Berechnung der organischen Trockensubstanz des Substrats . . . . .	XVII
B.10	Berechnung der Korngrößenverteilung der kompostierten Biomasse . . . . .	XVIII
B.11	Berechnung der organischen Trockensubstanz der kompostierten Biomasse . .	XVIII
B.12	Messung der Biomeilerhöhe $t_v = 128\ d$ . . . . .	XIX
B.13	Irrtumswahrscheinlichkeit $\alpha$ für die Überprüfung der Rotationssymmetrie, Tem- peratursensoren . . . . .	XX
B.14	Messung des Bohrergewichts inkl. Produktprobe [g] am 19. und 20.9.17 . . . .	XX
C.1	Daten der Gefäße für Schüttdichteberechnung . . . . .	XXII
C.2	Vergleich der Schüttdichten je nach Gefäß . . . . .	XXII
C.3	Fehlerrechnung zur Volumenbestimmung der Biomeiler . . . . .	XXIV

# Abbildungsverzeichnis

3.1	Stickstoffgehalt und C:N-Verhältnis verschiedener Substrate [15] . . . . .	19
3.2	Idealisierter Temperaturverlauf des aeroben Abbaus (Batch-Prozess) [26] . . .	20
3.3	Aktive Belüftungsverfahren statischer Reaktoren [26] . . . . .	23
3.4	Passive Belüftungsverfahren ohne Einbauten statischer Reaktoren [26] . . . .	23
3.5	Dombelüftungsverfahren: Aufbau und Strömungsprofil [30] . . . . .	23
4.1	Übersichtsdarstellung des Simulationsmodells zur „Prozesssimulation biologischer Abbauprozesse im Bereich der Abfallwirtschaft“ [43] . . . . .	25
4.2	Prinzipieller Bilanzraum für die Wärmebilanz . . . . .	26
4.3	Möglichkeiten des Wärmeentzugs aus der Kompostierung . . . . .	31
4.4	Herhof-Rottebox mit Wärmeentzug aus der Abluft, prinzipieller Aufbau [26] .	31
4.5	Technisch einfache WÜ-Systeme zum Wärmeentzug am bsp. Festmist [67] . . .	31
5.1	Lageplan der Biomeiler [105] . . . . .	39
5.2	Versuchsfeld: Baumumstandene Senke im Schlosspark der Stadt Wittenberg, Blick nach Norden mit Hochbeet und Baustelle der ersten Biomeiler . . . . .	39
5.3	Prinzipieller Aufbau der Biomeiler in horizontalen Schichten . . . . .	41
5.4	Fließschema und Messpunkte . . . . .	41
	(a) Seitenansicht . . . . .	41
	(b) Schnittebene $h_m$ . . . . .	41
	(a) Fließschema des Versuchsaufbaus . . . . .	41
	(b) Lage automatisierter (blau) und manueller (rot) MP . . . . .	41
5.5	Substratgeschichte und -zerkleinerung . . . . .	43
5.6	Durchmischung des Substrats am Versuchsfeld . . . . .	43
5.7	Pumpenlaufzeiten und Nennleistungen im Versuchszeitraum . . . . .	43
	(a) Substratsammlung Vockerode . . . . .	43
	(b) Doppstadt-Schredder . . . . .	43
	(a) Abladen des Containers auf Wall . . . . .	43
	(b) Überschieben des Substrats . . . . .	43
5.8	Messstellen für kompostierte Biomasse . . . . .	45
	(a) Probenahme kompostierter Biomasse . . . . .	45
	(b) Messpunkte der Kernbohrungen . . . . .	45
5.9	Geräte der Gasmessung . . . . .	48

(a)	Einheit der Gasmesslanze . . . . .	48
(b)	Biogasmonitor . . . . .	48
6.1	Korngrößenanalyse des Substrats: Verteilung und oTS . . . . .	56
(a)	Korngrößenverteilung . . . . .	56
(b)	oTS der Siebfraktionen . . . . .	56
6.2	Temperatur und Gaskonzentrationen im Seitenvergleich, BM 2A . . . . .	58
6.3	Korngrößenanalyse der kompostierten Biomasse: Verteilung und oTS . . . . .	60
(a)	Korngrößenverteilung . . . . .	60
(b)	oTS der Siebfraktionen . . . . .	60
6.4	Unterschiede im Substratabbau in Abhängigkeit von der Schichthöhe, aufgenommen nach Abhebung des Silonetz im Biomeiler . . . . .	61
(a)	$h = 0,5$ m . . . . .	61
(b)	$h = 1,0$ m . . . . .	61
(c)	$h = 1,4$ m . . . . .	61
6.5	Profil der Gaskonzentrationen $G$ [%] und der Temperatur $\vartheta$ [°C] im Zeitverlauf, BM mit Wärmeentzug (BM 2B) . . . . .	63
(a)	BM 2B, $t_V = 32$ d . . . . .	63
(b)	BM 2B, $t_V = 67$ d . . . . .	63
(c)	BM 2B, $t_V = 115$ d . . . . .	63
6.6	Profil der Gaskonzentrationen $G$ [%] und der Temperatur $\vartheta$ [°C] im Zeitverlauf, BM ohne Wärmeentzug (BM 2C) . . . . .	64
(a)	BM 2C, $t_V = 46$ d . . . . .	64
(b)	BM 2C, $t_V = 67$ d . . . . .	64
(c)	BM 2C, $t_V = 115$ d . . . . .	64
6.7	Weißer Ring als Indiz für den Übergangsbereich von aerob zu anaerob . . . . .	65
(a)	Abstand zu Reaktorgrenze, BM 4B $h = 1,4$ m . . . . .	65
(b)	Gesamtbild, BM 3B $h = 1,6$ m . . . . .	65
6.8	Breite des schichtspezifischen Übergangsbereich (aerob-anaerob), BM 3B . . . . .	66
(a)	$h = 1,6$ m . . . . .	66
(b)	$h = 1,1$ m . . . . .	66
(c)	$h = 0,6$ m . . . . .	66
6.9	Oberflächentemperatur im Fern - und Nahbild von Mantel- und Deckfläche der Biomeiler . . . . .	69
6.10	Vergleich Temperaturniveau der Biomeiler . . . . .	71
(a)	Temperatur Mittensensoren, $t_V = 35 - 50$ d . . . . .	71
(b)	Temperatur Mittensensoren, $t_V = 112 - 127$ d . . . . .	71
6.11	Wetterlage im Versuchszeitraum . . . . .	73
6.12	Temperaturverläufe der Biomeiler Gr. 2 . . . . .	73
6.13	Korrelationsmatrix mit Korrelationskoeffizient (Pearson) und p-Wert (Sterne) . . . . .	78



6.14	Bilanzraum für die Wärmebilanz eines Biomeilers . . . . .	81
6.15	Vereinfachte Modell-Darstellung des vertikalen Profils, $t_V = 30$ d . . . . .	83
7.1	Vorschlag für einen optimierten Versuchsaufbau mit automatisierter BM-Kerntemperatur-Regelung und Speicher (blau angedeutet) . . . . .	87
A.1	Aufbau der Biomeiler mit WÜ und Sensorrohren, Aufbauart II . . . . .	I
A.2	Temperatur und Gaszusammensetzung im Seitenvergleich, BM 2B . . . . .	II
A.3	Temperatur und Gaszusammensetzung im Seitenvergleich, BM 2C . . . . .	III
A.4	Temperatur und Gaszusammensetzung im Seitenvergleich, BM 2D . . . . .	IV
A.5	Schüttdichte $\rho_{BM}$ abh. von der Schichthöhe $h_{u..o}$ , Probenahme Produkt . . . .	V
A.6	Profil der Gaskonzentrationen $G$ [%] und der Temperatur $\vartheta$ [°C] im Zeitverlauf, 50 Tage Wärmeentzug, BM 2A . . . . .	VI
	(a) BM 2A, $t_V = 32$ d . . . . .	VI
	(b) BM 2A, $t_V = 67$ d . . . . .	VI
	(c) BM 2A, $t_V = 115$ d . . . . .	VI
A.7	Profil der Gaskonzentrationen $G$ [%] und der Temperatur $\vartheta$ [°C] im Zeitverlauf mit Wärmeentzug, BM 2D . . . . .	VII
	(a) BM 2D, $t_V = 46$ d . . . . .	VII
	(b) BM 2D, $t_V = 67$ d . . . . .	VII
	(c) BM 2D, $t_V = 115$ d . . . . .	VII
A.8	Oberflächentemperatur ausgewählter Stellen . . . . .	IX
A.9	Temperaturverläufe im Abstand zum WÜ $\Delta s$ (1) . . . . .	X
	(a) BM 1B - Mittensensor (schwarz) und Seitensensor $h_m$ (rot), $\Delta s \approx 0,3$ m . . . . .	X
	(b) BM 2D - Mittensensor (schwarz) und Seitensensor $h_m$ (rot), $\Delta s \approx 0,6$ m . . . . .	X
A.10	Temperaturverläufe im Abstand zum WÜ $\Delta s$ (2) . . . . .	XI
	(a) BM 3A - Mittensensor (schwarz) und Seitensensor $h_m$ (rot), $\Delta s \approx 1$ m . . . . .	XI
	(b) BM 4B - Mittensensor (schwarz) und Seitensensor $h_m$ (rot), $\Delta s \approx 1,5$ m . . . . .	XI
A.11	BM 4A - Mittensensor (schwarz) und Seitensensor $h_m$ (rot), $\Delta s \approx 1,5$ m . . . . .	XII
A.12	Abziehen des Silonetz ermöglicht horizontale Schnittebene . . . . .	XII
B.1	Substrat der losen Schüttung nach dem Abladen . . . . .	XIV
	(a) Bereich mit eher Feinanteil . . . . .	XIV
	(b) Bereich mit eher Grobanteil . . . . .	XIV
B.2	Versuchsfeld vor und nach dem Versuchszeitraum . . . . .	XIX
	(a) Biomeiler nach Aufbau . . . . .	XIX
	(b) Biomeiler vor Abbau . . . . .	XIX
C.1	Gefäße getestet für Schüttdichtemessung . . . . .	XXII
	(a) Eimer . . . . .	XXII
	(b) Wanne . . . . .	XXII
	(c) Kübel . . . . .	XXII

# Abkürzungen und Formelzeichen

## Abkürzungen

Abkürzung	Bezeichnung
A:V-Verhältnis	Oberflächen-Volumen-Verhältnis
Abb.	Abbildung
abh.	abhängig
BM	Biomeiler
C:N-Verhältnis	Verhältnis vom elementaren Kohlenstoff zum elementaren Stickstoff
<i>C</i>	Kohlenstoff
ca.	circa
$CO_2$	Kohlenstoffdioxid
d.h.	das heißt
DBFZ	Deutsches Biomasseforschungszentrum
ggf.	gegebenenfalls
Gr.	Größenkategorie
<i>H</i>	Wasserstoff
$H_2O$	Wasser
inkl.	inklusive
LSK	Wärmeleitung, -strahlung und Konvektion
MO	Mikroorganismen
M	Milieu
MP	Messpunkt
MS	Messstelle
<i>N</i>	Stickstoff
Nr.	Nummer
$O_2$	Sauerstoff
PE	Polyethylen
<i>S</i>	Schwefel
Tab.	Tabelle
u.a.	unter anderem
u.U.	unter Umständen
var.	verschiedene
v.a.	vor allem
vgl.	vergleiche
VOC	Flüchtige organische Verbindungen
WE	Wärmeentzug
Wdh.	Mehrfachbestimmung
WTM	Wärmeträgermedium
WÜ	Wärmeübertrager
z.B.	zum Beispiel

## Formelzeichen

Symbol	Bezeichnung	SI-Einheit
$a$	Anteil der Korngröße an Gesamtmasse	[%]
$A$	Fläche	[m <sup>2</sup> ]
$A_{solar}$	Oberfläche der Biomeiler durch Sonne bestrahlt	[m <sup>2</sup> ]
$A_W$	Oberfläche des Wärmeübertragers mit Kontakt zur Biomasse	[m <sup>2</sup> ]
$c_m$	Mittlere spezifische Wärmekapazität	[J/kg * K]
$d$	Durchmesser	[m]
$G$	Gaskonzentration	[%]
$GV$	Glühverlust	[% <sub>GV</sub> ]
$h$	Höhe, Strecke senkrecht zur Erdoberfläche	[m]
$h_u$	Höhe der unteren WÜ-Schicht im BM	[m]
$h_m$	Höhe der mittleren WÜ-Schicht im BM	[m]
$h_o$	Höhe der oberen WÜ-Schicht im BM	[m]
$\bar{h}_D$	spezifische Enthalpie des Wasserdampfs im Kompost	[m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]
$\bar{h}_L$	spezifische Enthalpie der trockenen Luft im Kompost	[m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]
$H_i$	Heizwert der Komponenten des Substrats	[ J/kg]
$i, j, k$	Laufvariable	[-]
$K$	Komprimierung des Substrat	[%]
$l, b, h$	Längeneinheit (Länge, Breite, Höhe)	[m]
$m$	Masse	[kg]
$m_{BB}$	Masse des Bohrergewichts inkl. Bodenprobe	[kg]
$\dot{m}_D$	Massestrom des Wasserdampfs im Kompost	[kg/s]
$\dot{m}_L$	Massestrom der trockenen Luft im Kompost	[kg/s]
$N$	Anzahl	[-]
$n$	eine natürliche Zahl ( $\in \mathbb{N}$ )	[-]
$oTS$	gesamter organischer Kohlenstoff	[% <sub>oTS</sub> ]
$Q$	Wärmemenge	[J]
$Q_{nutz}$	aus dem Kompostierungsprozess entziehbare Wärmemenge	[J]
$q_{nutz}$	aus dem Kompostierungsprozess entziehbare Wärmemenge auf die Trockensubstanz ( $TS$ ) bezogen	[J/kg <sub>TS</sub> ]
$\dot{Q}_{leit}$	Wärmeenergiestrom der Wärmeleitung	[W]
$\dot{Q}_{konv}$	Wärmeenergiestrom der Konvektion	[W]
$\dot{Q}_{nutz}$	die aus einem Reaktor entziehbare Wärmeleistung im WÜ	[W]
$\dot{q}_{nutz}$	die aus einem Reaktor entziehbare Wärmeleistung auf die Trockensubstanz ( $TS$ ) bezogen	[W/kg <sub>TS</sub> ]
$\dot{Q}_R$	Reaktionswärme des biochemischen Abbauprozesses	[W]
$\dot{Q}_{Spei}$	Änderung des Wärmegehalts des Reaktors	[W]
$\dot{Q}_V$	Wärmeverluststrom über Oberfläche des Reaktors	[W]
$\dot{Q}_{zu}$	Wärmestrom in den Bilanzraum des Reaktors	[W]
$s$	(Einstech-)Tiefe, Strecke senkrecht zur Reaktoroberfläche	[m]
$s_r$	Einstechtiefe in Radius-Länge	[m]

Symbol	Bezeichnung	SI-Einheit
$t_V$	Versuchszeit	[d]
$t_s$	Strahlungszeit der Sonne	[h]
$TS$	Trockensubstanz	[% $_{TS}$ ]
$V$	Volumen	[m <sup>3</sup> ]
$V_{ZH_2O}$	beim Aufbau dem Biomeiler zugeführte Wassermenge	[m <sup>3</sup> ]
$\dot{V}$	Volumenstrom	[m <sup>3</sup> /s]
$w$	Windgeschwindigkeit	[m/s]
$W$	Wassergehalt	[%]
$\alpha$	Irrtumswahrscheinlichkeit	[-]
$\Delta$	Differenz	[-]
$\varepsilon$	Emissionsgrad	[-]
$\eta$	Abbaugrad	[-]
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit	[W/m * K]
$\varrho$	Dichte	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\vartheta$	Temperatur	[°C]
$\vartheta_v$	Vorlauftemperatur	[°C]
$\vartheta_r$	Rücklauftemperatur	[°C]
$\vartheta_{h_u}$	Temperatur der unteren (WÜ-)Schicht im Biomeiler	[°C]
$\vartheta_{h_o}$	Temperatur der mittleren (WÜ-)Schicht im Biomeiler	[°C]
$\vartheta_{h_o}$	Temperatur der oberen (WÜ-)Schicht im Biomeiler	[°C]
$\vartheta_{h_m \vee h_u} - \vartheta_r$	Temperaturdifferenz zwischen dem Rücklauf und der untersten be- messenen Biomeilerschicht	[K]
$\vartheta_U$	Umgebungstemperatur der Luft	[°C]
$\xi$	Massenanteil	[-]
$\zeta$	Druckverlustbeiwert	[-]
$\mathbf{F}^+$	Fehlermatrix, positives Intervall	
$\mathbf{F}^-$	Fehlermatrix, negatives Intervall	
$\mathbf{H}$	Hypothesenmatrix	
$\mathbf{M}$	Matrix der Messwerte	
$\mathbf{X}$	Messgenauigkeit der Messgeräte abh. vom Messwert, Teil der Fehlermatrix	
$\mathbf{Y}$	Fehler aufgrund des Probevolumens, Teil der Fehlermatrix	
$\mathbf{Z}$	zufällige Messfehler in Abhängigkeit von der Einstechtiefe, Teil der Fehlermatrix	
<b>Häufige Indizes:</b>		
BM	Biomeiler	
glueh	geglühte Masse mit Tiegel	
K	Kübel	
leer	Leermasse des Tiegels	
P	Produkt (Kompost)	
S	Substrat	
trock	getrocknete Masse mit Tiegel	
U	Umgebung	
O	Oberfläche	

# 1 Einleitung

Die Gestaltung einer nachhaltigen, wachsenden Ökonomie ist seit Jahren ein wichtiges Thema politischer Gruppen und war auch in der Bundestagswahl 2017 eines der Wahlkampfthemen. Initiativen wie die UN-Klimakonferenz in Paris im Dezember 2015 oder die Nationale Forschungsstrategie BioÖkonomie 2030 legen ihren Fokus auf die Fragestellung: Wie kann eine nachhaltige Wirtschaft aussehen, die in der Lage ist auch eine wachsende Weltbevölkerung ausreichend zu versorgen? Eine wichtige Säule dafür ist die Nutzung regionaler Stoffkreisläufe und der Ausbau einer regenerativen Energieversorgung.

Besonders bedeutsam ist dabei die stoffliche und energetische Nutzung organischer Reststoffe. Einerseits können sie im Sinne einer Kreislaufwirtschaft wieder als Ressourcen zur Verfügung stehen und andererseits gibt es keine Konkurrenzanwendungen vor allem in den Bereichen „Tank oder Teller“. In der Praxis bedeutet dies, dass nun Verfahren für regionale Gegebenheiten entwickelt werden, welche bisher aufgrund zentralisierter Versorgungsstrategien nicht konkurrenzfähig waren. Hierzu zählen Verfahren zur Gebäudeenergieversorgung im Niedertemperatur-Bereich u.a. der Wärmeentzug aus dem aeroben Abbau von Biomasse.

Der konventionell praktizierte aerobe Abbau von Biomasse, bsp. in städtischen Kompostierungsanlagen, hat den möglichst schnellen Abbau anfallender Stoffmengen zu einem stabilen Produkt zum Ziel. In diesen Prozess kann eine Abwärmenutzung (bsp. aus dem Kühlkreislauf der Rotteboxen) integriert werden. Eine weitere Möglichkeit ist die Auslegung eines Festbettreaktors zur kontinuierlichen, weitgehend dezentralen Wärmeengewinnung zu Heizzwecken oder der Warmwasserbereitung. Eine statische Kompostmiete, deren primäre Aufgabe die Abwärmenutzung ist und auch eine stoffliche Nutzung des Produkts Kompost zulässt, wird im deutschen Sprachraum als „Biomeiler“ bezeichnet.

Die erste europäische Beschreibung zur Nutzung eines Biomeilers für die Energieversorgung stammt aus den Zeiten der Ölkrise 1972 [1]. Eine Technisierung und Professionalisierung fand ab den 80er Jahren statt. Untersuchungen dazu finden sich sowohl in Europa [2–6] als auch den USA [7, 8]. Auf großtechnischer und industrieller Ebene ist die Nutzung der Kompostierung als Niedertemperatur-Wärmequelle erst in den letzten Jahren attraktiv geworden. Einen geschichtlichen Überblick und eine Einordnung der Verfahren gibt es in [9, 10] und [11].

## 2 Problemstellung und Zielsetzung

Betrachtet man die Kinetik der Kompostierung in Zusammenhang mit der thermodynamischen Umwandlung, kann von einer langsamen, biochemischen Oxidation in Form eines exothermen Prozesses gesprochen werden [12]. Theoretisch kann aus dem exothermen Prozess Wärme entzogen werden, sofern der Prozess nicht maßgeblich gestört wird. Vorangegangene Arbeiten konnten zeigen, dass der Kompostierungsprozess für eine kombinierte stofflich-energetische Nutzung vor allem im ländlichen Raum gewinnbringend einsetzbar sein könnte [11]. Es existieren Veröffentlichungen mit sehr unterschiedlichen theoretischen Hintergründen und fachlichen Ansätzen zum Wärmeentzug (WE) aus dem aeroben Abbau von Biomasse. Bisher gibt es kaum wissenschaftlich dokumentierte, systematische Untersuchungen dieser Systeme im Pilotmaßstab [10, 13]. Somit besteht ein Bedarf an empirischen Daten zu diesem Thema.

Im Rahmen eines Kunstprojekts zur Weltausstellung für das 500-jährige Reformationsjubiläum werden in der Stadt Wittenberg 11 unbelüftete Festbettreaktoren mit Rohrschleifen-Wärmeübertragern, sog. Biomeiler (BM), zur Beheizung eines tropischen Pflanzenbeets errichtet. Das Objekt soll genutzt werden, um das Betriebsverhalten von Biomeilern in der regulären Aufbauweise darzustellen und systematisch zu untersuchen. Dabei sind keine Änderungen an dem Versuchsaufbau oder dem grundlegenden messtechnischen Konzept möglich.

Folgende Aufgaben werden bearbeitet:

- Darstellung der Kompostierung im Hinblick auf die Wärmeauskopplung
- Überprüfung theoretischer Ansätze zum Wärmeentzug aus der Kompostierung
- Darstellung üblicher Verfahren und deren Wärmeleistungen
- Auswertung der Messergebnisse des Versuchs
- Verdeutlichung systematischer Effekte
- Bewertung des Versuchsaufbaus und des messtechnischen Konzepts
- Erarbeitung von Vorschlägen für einen weiterführenden Versuchsaufbau

Dabei soll der Fokus der vorliegenden Arbeit auf die besonderen Bedingungen des Wärmeentzugs aus den komplexen, biochemischen Abbauvorgängen von Biomasse gelegt werden. Entsprechend werden zunächst theoretische Annahmen überprüft und vor allem qualitative Aussagen getroffen werden.

# 3 Grundlagen der Kompostierung

## 3.1 Definition

Es existiert bisher keine einheitliche Definition für den Begriff der Kompostierung. In dieser Arbeit wird der Begriff wie folgt verwendet: Die Kompostierung ist der biologische Abbau von organischem Material unter kontrollierten, aeroben Bedingungen zu einem humusartigen, stabilen Produkt [14]. Dies entspricht einer biologischen Stabilisierung mit Nährstofferhalt.

Die Verfügbarkeit von Sauerstoff und der Wassergehalt haben neben der Aufbereitung des Substrats, der Nährstoffzusammensetzung und der Temperaturführung den größten Einfluss auf den Prozess im Festbettreaktor. Alle genannten Parameter beeinflussen sich gegenseitig und den Verlauf des Kompostierungsprozesses [15].

Die **Produkte** sind vornehmlich Kompost, Kohlenstoffdioxid ( $CO_2$ ), Wasser und Wärme [12]. In der verarbeitenden Industrie wird die **Qualität** des Kompost definiert durch seine Fähigkeit, das Bodengefüge positiv zu beeinflussen und das Pflanzenwachstum zu verbessern (Wasserspeicherfähigkeit, Huminstoffgehalt) [16]. In der herstellenden Industrie erfolgt die Bewertung durch die Parameter der Reife (Abwesenheit von phytotoxischen Stoffen) und Stabilität (Geruchsneutralität, keine Selbsterhitzung bzw. erhöhte biochemische Aktivität) [15, 17].

## 3.2 Mikroorganismen der Kompostierung

Der gesamte Prozess wird durch Bodenkleintiere und Mikroorganismen (Bakterien, Pilze) induziert. Diese sind an den Abbauvorgängen (u.a. Gärung und Fäulnis) und an den Aufbauvorgängen (Mineralisierung und Humifizierung) beteiligt [16, 18].

Prinzipiell sind alle organischen **Substrate** durch Mikroorganismen (MO) abbaubar. Selbst in Milieus mit ausschließlich schwer und mittelschwer abbaubarem Material (Tabelle 3.1) bilden sich angepasste Populationen aus [14]. Eine Klassifizierung der MO kann aufgrund der genutzten Kohlenstoffquelle und den Elektronendonatoren erfolgen [12]. Weiterhin können die MO nach ihren **Temperaturtoleranzen**/optima in drei Gruppen aufgeteilt werden: Psychrotolerant (0-25 °C), mesophil (25-45 °C), thermophil (> 45 °C) [14]. Je nach Kompostierungsprozess und -bedingungen kommt es aufgrund der Temperaturänderung sowie Nähr- und Intermediärstoffverfügbarkeit im Zeitverlauf zu mehrfachen Populationswechseln [14].

Die **MO-Populationen** variieren je nach Substrat, Temperaturphase und Technologie (Umsetzen, Belüftung) [12, 19]. Es existieren einige Untersuchungen zu MO-Populationen, die auf-

Tabelle 3.1: Allgemeine Abbaubarkeit bestimmter Stoffgruppen [22]

Abbaubarkeit	Stoffgruppe
leicht	Zucker, Stärke, Pektine, Eiweißverbindungen, z.T. Fette
mittelschwer	Hemicellulosen, Cellulosen, Wachse, Öle
schwer	Lignine, Harze
nicht/kaum	Leder, Gummi, Kunststoffe

grund der Heterogenität des Kompostierungsprozesses und den analytischen Methoden nicht abschließend sein können [20, 21]. Es wird davon ausgegangen, dass ca. 80 % der MO-Aktivität von Bakterien gebildet wird [12, 14], besonders während der mesophilen und thermophilen Anfangsphase. In der Reifephase werden v.a. die (mittel)schwer abbaubaren Stoffe und Intermediärstoffe metabolisiert und die MO-Population wechselt zu Ligno-Cellulose-abbaufähigen Organismen. Deswegen werden in der Nachrotte mehr Pilze nachgewiesen [22, 23].

### 3.3 Substrat

#### 3.3.1 Nährstoffe

Die wichtigsten Nährstoffe sind **Kohlenstoff C** und **Stickstoff N**. Ein Teil des Kohlenstoffs wird in der Zellsubstanz der MO eingebaut und der andere Teil dient der Zellatmung. Der Stickstoff wird von den MO für die Synthese von Proteinen verwendet.

Die Kenntnis des **C:N-Verhältnisses** erlaubt somit Aussagen über den Verlauf und das Milieu des Kompostierungsprozesses. Für die industrielle Kompostierung wird ein Verhältnis von ca. 25:1 bis 30:1 als ideal angesehen. Kleinere Verhältnisse können zur Ammoniakfreisetzung führen, während weitere Verhältnisse den Kompostierungsprozess signifikant verlangsamen [15]. Abbildung 3.1 gibt einen Überblick zum C:N-Verhältnis bestimmter Stoffe.

Tabelle 3.1 enthält die **Abbaubarkeit** der Stoffgruppen. Während des Kompostierungsprozesses werden zuerst die leicht abbaubaren und leicht verfügbaren Stoffe von den MO fermentiert [22]. Dies geht mit einer erhöhten Reaktionswärme und MO-Aktivität einher. Sind diese Stoffgruppen aufgebraucht, nutzen die MO andere Stoffwechselwege oder die MO-Population ändert sich [22]. Dies geht mit Temperatur- und Aktivitätsveränderungen einher (vgl. Abschnitt 3.2).

#### 3.3.2 Wassergehalt

Der Wassergehalt  $W$  kann zu einem Faktor mit limitierender Wirkung werden. Untersuchungen aus der Bodenkunde zeigen, dass bei einem Wassergehalt von unter 40 Masse-% die Aktivität der MO abnimmt und bei unter 20 Masse-% die MO ihre Aktivität fast vollständig einstellen. Generell sind Pilze und Actinomyceten toleranter gegenüber einem geringen Wassergehalt. Wenn der Wassergehalt 60 Masse-% überschreitet, kann die Durchströmung beeinträchtigt werden und Sauerstoff ( $O_2$ ) zum limitierenden Faktor werden. [15, 24]



Compost Feedstock	Nitrogen Percent		Reference
	Dry Weight	C:N Ratio	
MSW, United States	0.2–3	15	Miscellaneous data
MSW, Japan	1.2–2.7	13–32	Inoko et al., 1979
Digested biosolids	0.5–3.4	15.7	Parker and Sommers, 1983
			Poincelot, 1975
Fruit waste	1.52	34.8	Poincelot, 1975
Yard waste	1.95	22.8	Kayhanian and Tchobanoglous, 1992
Paper	0.25	173	Poincelot, 1975
Sawdust	0.11	511	Poincelot, 1975
Grass	2.46–5.0	40–20	Michel et al., 1993
			E&A Environmental Consultants, 1994
Leaves	0.93	48	Michel et al., 1993
Produce waste	0.8–2.5	15–25	E&A Environmental Consultants, 1993b
Food waste	3.2	15.6	Kayhanian and Tchobanoglous, 1992
			Epstein et al., 2005
Pharmaceutical waste	2.55	19	Poincelot, 1975
Wood (pine)	0.07	723	Poincelot, 1975
Oat straw	1.05	48	Gotaas, 1956
Wheat straw	0.3	128	Gotaas, 1956
Dairy manure	2.9	15	Michel et al., 2004

Abbildung 3.1: Stickstoffgehalt und C:N-Verhältnis verschiedener Substrate [15]

Durch die Wärmeentwicklung, die Abluftführung (je nach Technologie) und Umgebungsbedingungen (bsp. Windexposition, Außentemperatur) wird beständig Wasser ausgetragen. Deswegen wird dieser Parameter in der industriellen Kompostierung überwacht und eventuell durch eine Bewässerung reguliert. [15]

### 3.3.3 Porengröße und Partikelgröße

Die Porengröße ist entscheidend für die **Durchströmrbarkeit** des Substrats. Die Sauerstoffverfügbarkeit ist somit eine Funktion der Porengröße [15, 25]. Sie ist abhängig von dem eingesetzten Material, dessen Partikelgröße, Strukturstabilität und dem Wassergehalt. Bei der biologischen Abfallbehandlung beträgt das freie Porenvolumen idealerweise ca. 30 % und der Luftvolumenanteil ca. 50 % [22].

## 3.4 Temperatur, Kohlenstoffdioxid und Sauerstoff

### 3.4.1 Zusammenhänge

Die Aufnahme von Kohlenstoff unter Sauerstoffverbrauch zur Energiegewinnung der MO (auch Zellatmung genannt) geschieht unter Abgabe von Wärme und  $CO_2$ . Bei einem anaeroben Abbauprozess wird weniger Wärme erzeugt, beispielsweise bei der Verstoffwechselung von Glukose nur 448 kJ/mol statt 2834 kJ/mol [12].

Bei aerober Prozessführung sind der Sauerstoffbedarf und die  $CO_2$ -Emissionen ungefähr proportional zum Temperaturverlauf. Dies ist eine idealisierte Betrachtung, da eine Vielzahl der

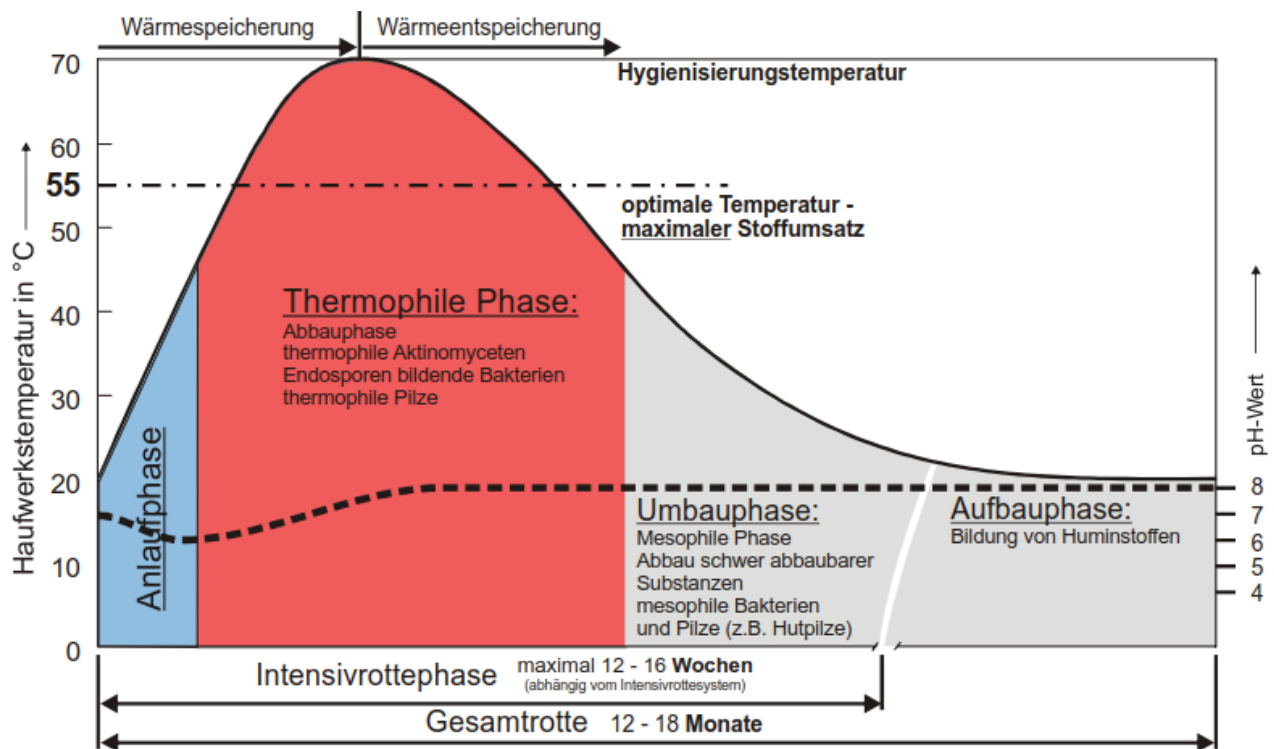


Abbildung 3.2: Idealisierter Temperaturverlauf des aeroben Abbaus (Batch-Prozess) [26]

Prozess- und Substratparameter die Verläufe beeinflussen. Des Weiteren ist die Temperatur ein Maßstab für den Stoffwechsel/Aktivität der MO sowie für die verfügbaren Nährstoffe [15]. Man unterscheidet vier Temperaturphasen des aeroben Abbaus [12] (Abb. 3.2):

- Anlaufphase (auch: mesophile Anfangsphase)
- thermophile Phase (auch: Heißrotte)
- Umbauphase (auch: Abkühlungsphase)
- Aufbauphase (auch: Nachrotte oder Reifephase)

### 3.4.2 Hygienisierung

Zur seuchenhygienischen Gefahrenabwehr ist es notwendig, human- und tierpathogene Organismen sowie Unkrautsamen und Erreger von Pflanzenkrankheiten abzutöten [27]. In der industriellen Kompostierung ist es üblich, diese Hygienisierung über eine Temperatur-Zeit-Funktion herzustellen (Thermohygienisierung). Die Bioabfallverordnung schreibt für offene Mieten Temperaturen von  $> 55\text{ °C}$  für zusammenhängende zwei Wochen oder  $> 65\text{ °C}$  für eine Woche vor [28]. Eine homogene Temperaturverteilung ist hierbei essentiell, um eine Rekontamination zu verhindern. [12] gibt weitere hygienisierende Faktoren an, wie z.B. Antagonismen der MO, pH und die mikrobielle Produktion von Antibiotika. Diese Faktoren treten vermehrt in der Reifephase auf, welche in der Industrie aus ökonomischen Gründen sehr kurz gehalten wird. Somit ist eine Hygienisierung nicht prinzipiell an eine thermische Inaktivierung gebunden, sofern eine ausreichende Reifephase ermöglicht werden kann.

### 3.4.3 Temperaturführung

Es existieren einige Kontroversen bezüglich der Temperaturführung eines Kompostierungsprozesses. Die schnellste Kompostierung findet bei der größten Sauerstoffaufnahme statt, weil sie die höchste MO-Aktivität anzeigt. Dies ist je nach Substrat unterschiedlich. Im industriellen und kommunalen Bereich werden Temperaturen von 45 - 55 °C genutzt. Diese Temperaturen führen auch zu einer Stabilisierung in kürzester Zeit [13, 15]. Für eine Hygienisierung, ist es notwendig, dass höhere Temperaturen für einen Zeitraum gehalten werden. Für den Aufbau von Huminstoffen ist die zeitweise Bevorteilung thermophiler MO in einer Heißrotte > 65 °C und der thermische Aufschluss schwer abbaubarer Substrate wesentlich [14, 16].

## 3.5 Belüftungsverfahren statischer Reaktoren

### 3.5.1 Bedeutung

Die Belüftung hat einen primären Einfluss auf die Sauerstoffversorgung der Biomasse, das Temperaturfeld im Reaktor und die Verteilung des Wassergehalts in der Biomasse. Sie dient außerdem der Wärmeabfuhr, um hemmende Temperaturen für die MO zu vermeiden. Eine statische Kompostmiete, deren Substrat aus biologisch-abbaubarer Biomasse besteht, wird in dieser Arbeit als Festbettreaktor bezeichnet.

### 3.5.2 Aktive Belüftungsverfahren

Diese Belüftungsverfahren nutzen eine erzwungene Konvektion und drücken oder saugen Luft durch den Festbettreaktor unter Aufwendung von zusätzlicher Energie. Sie werden auch als Zwangsbelüftungen bezeichnet. Zur Realisierung sind verschiedenste technische Lösungen bekannt (z.B. Abb. 3.3). Ein Vorteil dieser Systeme ist, dass die Sauerstoffversorgung und Wärmeabfuhr von schwer durchströmbaren Substraten (bsp. mit hohem Wassergehalt) möglich wird. Auch die vollautomatische Steuerung dieser Systeme über die Messung von Regelparametern (Wassergehalt, Struktur, Luftporenvolumen, Sauerstoffgehalt, Temperatur) ist von Vorteil. Nachteilig wirken sich, neben hohen Betriebskosten, die Bildung von bevorzugten Luftwegen (Randwegigkeiten) im Haufwerk aus. Dies kann besonders in geschlossenen Systemen (Chargen- oder Durchlaufprinzip) beobachtet werden. Entlang dieser Ströme trocknet das Substrat verstärkt aus und es entstehen einerseits Kurzschlussströme und andererseits anaerobe Zonen. Eine Steuerungsmöglichkeit über eine Abluftanalyse ist somit nicht immer gegeben [16].

### 3.5.3 Passive Belüftungsverfahren

Diese Belüftungsverfahren nutzen die freie Konvektion durch den thermischen Auftrieb um eine Sauerstoffversorgung der MO im Festbettreaktor zu erreichen. Werden keine Einbauten verwendet, bezeichnet man diese Belüftungsverfahren auch als „Natürliche Belüftungen“. In Abbildung 3.4 sind die konventionellen Möglichkeiten hierfür dargestellt. Verwendung finden diese Verfahren vornehmlich zur Nachrotte oder zur Vorbereitung des Abfallguts (bsp. mechanisch-biologische Abfallbehandlung) verwendet.

Prinzipiell ist die passive Belüftung bei fachlich korrekter Gestaltung für eine ausreichende Wärmeabfuhr und Versorgung mit Sauerstoff geeignet [29, 30]. Untersuchungen an Laborreaktoren zeigen, dass besonders die passive Belüftung mit Einbauten ebenso effektiv ablaufen kann wie eine Zwangsbelüftung [29] und geringere Belüftungsraten zu einer längeren thermophilen Nachrotte führen. Dabei ist von einem höheren Grad der Homogenisierung auszugehen, nachgewiesen in Feldversuchen [31] und Laborreaktoren (600 L) [32].

Das Einbringen von perforierten Rohren oder Gittern zur Verbesserung der passiven Belüftung ist eine übliche Praxis und beschrieben u.a. in [33, 34]. Auch das Installieren einer Kurzschlussströmung durch die Miete mithilfe eines durchgängigen, perforierten Rohres (Kaminzugverfahren) ist in den 80er Jahren beschrieben [35] und in ähnlicher Form von [36, 37] aufgegriffen. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Verwendung vertikaler Rohre im Vergleich zu horizontalen Rohren (vgl. Sohlbelüftung) eine deutliche Veränderung im Temperaturverlauf bewirkt und ggf. zu einer höheren Abbaurate führen kann [36, 37]. Das idealisierte Durchströmungsprofil ist von [38] modelliert und kann diesen Effekt veranschaulichen, aber nicht experimentell bestätigen.

### 3.5.4 Dombelüftungsverfahren

Das Dombelüftungsverfahren ist eine Kombination aus nicht verbundenen, horizontalen und vertikalen Gitterrohren (Abb. 3.5). Der Zugang der Luft in die Miete wird regelbar, die Durchströmung erfolgt durch den Festbettreaktor. Dies resultiert in einer höheren Abbaurate als bei der Sohlbelüftung oder einem durchgängigen Rohr [39]. Das Dombelüftungsverfahren wurde u.a. für Restabfälle aus städtischen Haushalten eingesetzt und zeigt eine homogene Sauerstoffversorgung der gesamten Mietenmasse inkl. der Randzonen unterhalb der Isolierschicht [30].

Aufgrund der **Betriebsweisen** kann das Dombelüftungsverfahren als dynamisches Belüftungsverfahren bezeichnet werden. Es wird für die passive Belüftung von offenen, statischen Rottemieten eines gegebenen Substrats ausgelegt. Durch den Verschluss/Drosselung der Abluftführung kann ein Enthalpie- und Stoffstrom in den Festbettreaktor verhindert werden. Bei mangelnder konvektiver Belüftung des Festbettreaktors (Überhitzung, Sauerstofflimitation) kann die passive Belüftung durch Einblasen von Schleppluft temporär gestützt werden z.B. durch den Anschluss eines Industrieventilators.

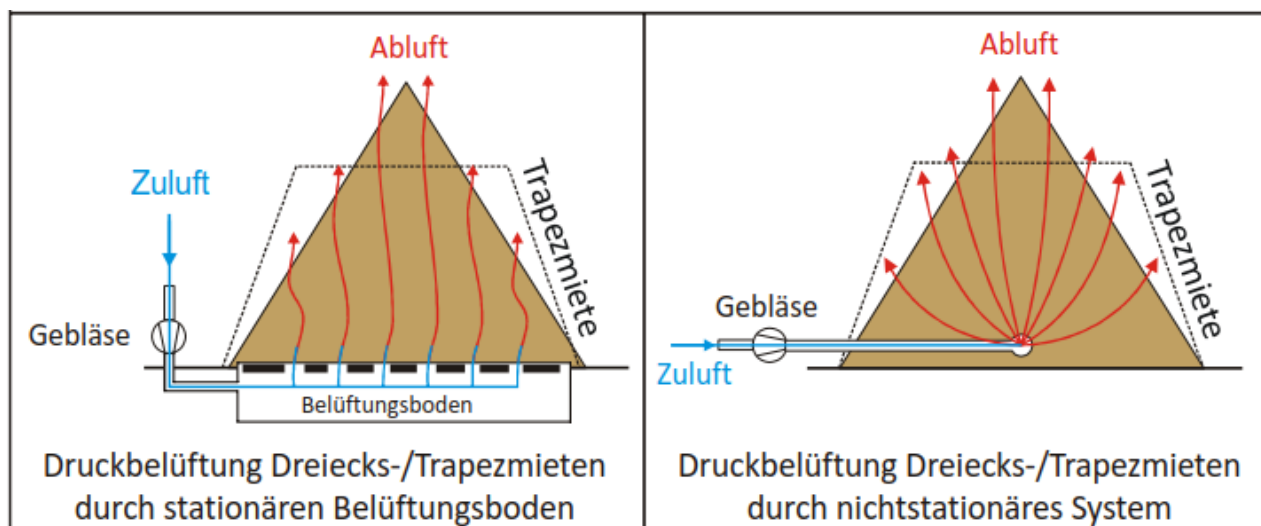


Abbildung 3.3: Aktive Belüftungsverfahren statischer Reaktoren [26]

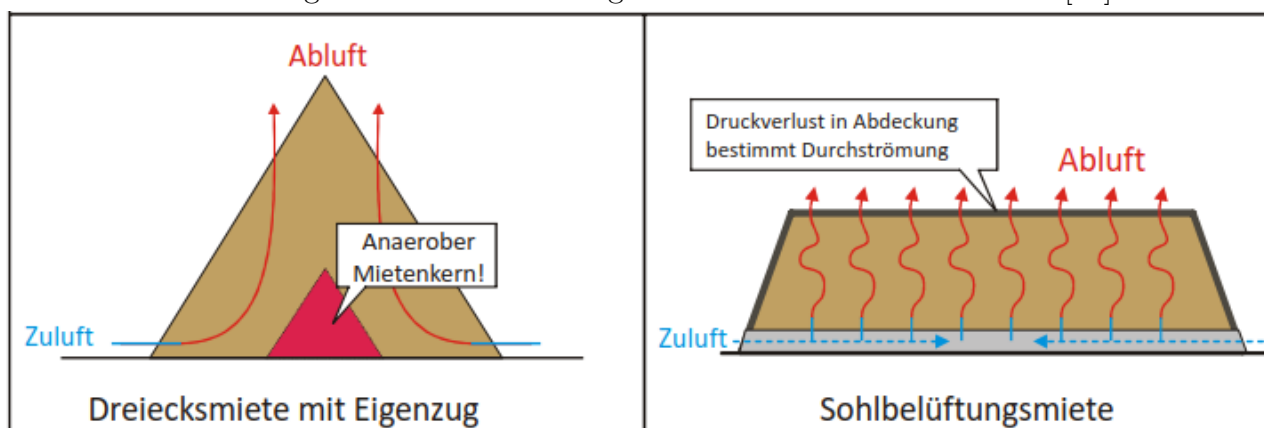


Abbildung 3.4: Passive Belüftungsverfahren ohne Einbauten statischer Reaktoren [26]

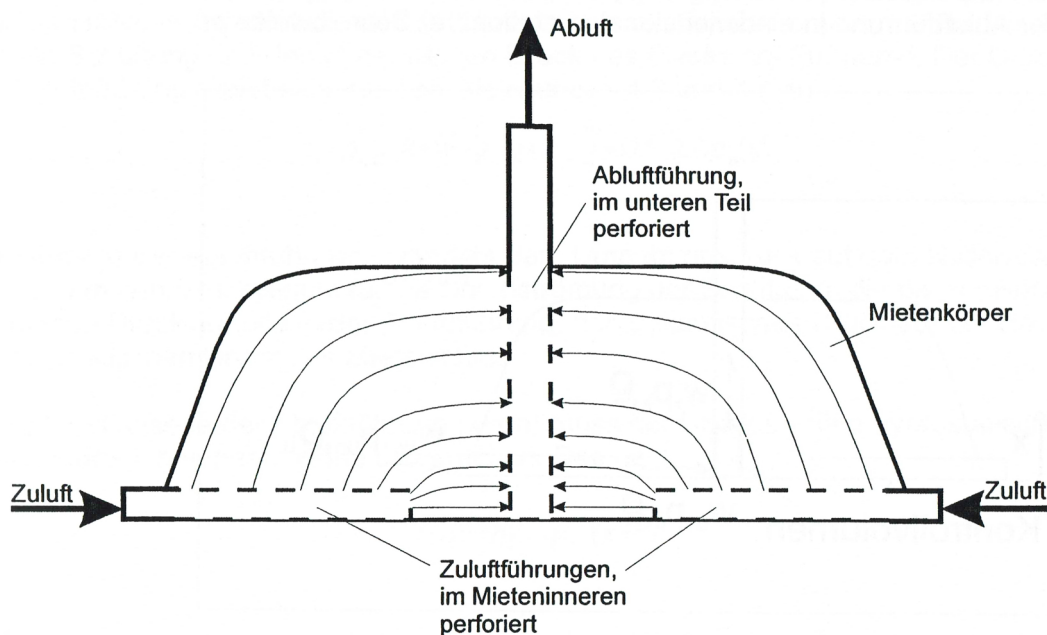


Abbildung 3.5: Dombelüftungsverfahren: Aufbau und Strömungsprofil [30]

# 4 Stand der Wissenschaft

## 4.1 Theoretische Modellierung

### 4.1.1 Allgemeines

Theoretische Auseinandersetzungen mit dem aeroben Abbau von Biomasse existieren vor allem im Bereich der Modellierung des Kompostierungsprozesses und der Prozesssteuerung von Kompostierungsanlagen (z.B. [12, 40–43]). Nach [44] existieren für die aerobe Abfallbehandlung vor allem deterministische Modelle, welche einzelne Teilprozesse teilweise stark vereinfachen. Dabei werden meist physikalische Betrachtungen vernachlässigt.

[45] stellt fest, dass nur sehr wenige Autoren ihre Modelle mit Experimenten verifizieren (z.B. [46, 47]) und nur sehr wenige Veröffentlichungen von Experimentalergebnissen auf Modelle zurückgreifen (z.B. [48]). Übersichten zu vorhanden Modellen befinden sich in z.B. [44, 49]. Die bis dato komplexeste Modellierung ist in Abbildung 4.1 dargestellt. Sie enthält sowohl eine differenzierte Modellierung der Thermodynamik, der Stofftransporte (Wasser,  $O_2$ ) und milieu-abhängiger biochemischer Reaktionen (gewichteter aerober und anaerober Abbau) als auch deren Verknüpfung mit fast ausschließlich mathematischen und physikalischen Gleichungen aus Chemie, Mikrobiologie und Physik. Hierdurch kann das Modell Prozesse allgemeingültiger abbilden als empirisch gewonnene Modellierungen. Dennoch besitzt es keine diskrete Verteilung der Zustandsgrößen im Raum. Im Folgenden werden die bisherigen Modellierungsansätze der wichtigsten Autoren und ggf. deren Validierung vorgestellt.

### 4.1.2 Thermodynamische Modellierung

#### 4.1.2.1 Wärmebilanz

Zur Bilanzierung der Wärmemengen und -ströme wird von einigen Autoren eine Wärmebilanz mit unterschiedlichen Detailierungsgraden aufgestellt (z.B. [30, 43, 50, 51]). Prinzipiell kann der in Abbildung 4.2 dargestellte Bilanzraum mit Gleichung 4.1 zugrunde gelegt werden. Je nach Forschungsgegenstand und Prozessführung werden die einzelnen Terme gesondert ausformuliert. Beispielsweise wird bei der theoretischen Analyse des Dombelüftungsverfahrens der konvektive Wärmestrom durch die Ab- und Zuluft gesondert betrachtet [30], während bei dem Vergleich von Labor- und Pilotanlagen der Wärmeverlustterm stark ausdifferenziert wird [50].

$$|\dot{Q}_{Spei}| = |\dot{Q}_R| + |\dot{Q}_Z| - |\dot{Q}_V| - |\dot{Q}_{konv}| \quad (4.1)$$

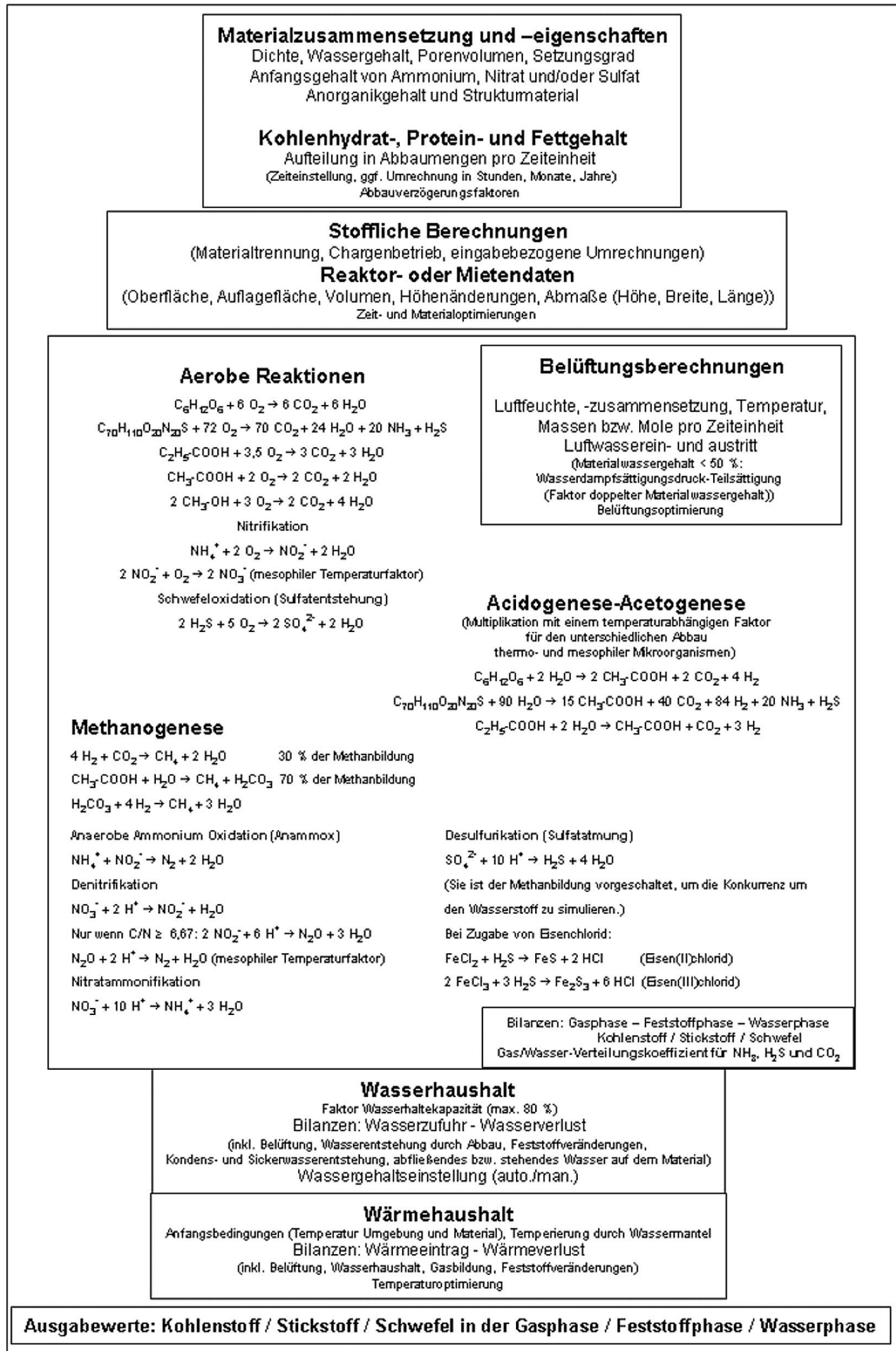


Abbildung 4.1: Übersichtsdarstellung des Simulationsmodells zur „Prozesssimulation biologischer Abbauprozesse im Bereich der Abfallwirtschaft“ [43]

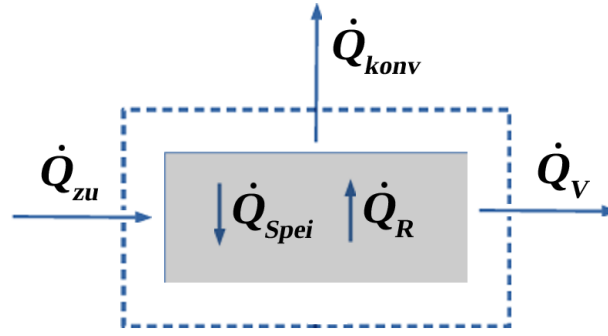


Abbildung 4.2: Prinzipieller Bilanzraum für die Wärmebilanz

#### 4.1.2.2 Speicherwärme und spezifische Wärmekapazität

Die Energie des Systems  $E$  kann in innere Energie  $U$ , potentielle Energie und kinetische Energie unterteilt werden. Die Änderung der potentiellen und kinetischen Energie, sowie die Arbeit kann bei der Systembetrachtung vernachlässigt werden (vgl. [43, 44]). Damit ergäbe sich ein offenes, instationäres System aufgrund der Gasbildung, Belüftung, Wasserzu- und -abfuhr und Substratmengenänderung [43]. Die Speicherwärme  $\dot{Q}_{Spei}$  beschreibt somit die Wärmemenge, welche die innere Energie  $U$  des Systems verändert.

Die spezifische Wärmekapazität  $c$  beschreibt die Fähigkeit eines Moleküls, Wärmeenergie zu speichern. Für die deterministische, thermodynamische Modellierung und die Modellierung der Wärmeübertragung ist eine Angabe der Wärmekapazität nötig. Nach [27] steigt die mittlere spezifische Wärmekapazität des Substrats  $c_m$  linear mit zunehmendem Wassergehalt  $W$  und reziprok zum Alter des Substrats. Sie kann vereinfacht mit Gl. 4.2 berechnet werden [52].

$$c_m = 1,2 + 2,99 \frac{W}{100} \quad [\text{J/kg} \cdot \text{K}] \quad (4.2)$$

#### 4.1.2.3 Wärmeübertragung

**Wärmeleitung** findet innerhalb des Substrats und zur Reaktorgrenze bzw. Umgebung statt. [43] erwähnt hierfür ein Modell für poröse Schüttungen (Gleichung 4.3 [53]), welches auf die aerobe Behandlung von Siedlungsabfällen übertragen werden kann [54]. Dabei wird der Wärmestrom durch Wärmeleitung  $\dot{Q}_{leit}$  resultierend aus einer Temperaturdifferenz senkrecht zur Fläche  $A$  über den Weg  $s$  berechnet. Gemessen wird die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  u.a. von [45, 52, 55]. Die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  von Kompost bzw. kompostfähigem Substrat variiert mit der Temperatur  $\vartheta$ , dem Wassergehalt  $W$ , der Dichte  $\rho$  und dem Alter des Komposts  $t_V$ . Die Werte liegen im Bereich von 0,150 bis 0,305 W/m \* K (städtischer Bioabfall) [55] oder mit steigendem Wassergehalt  $W$  auch höher [56]. Die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  ist somit im Vergleich zu anderen Stoffen als mäßig wärmeleitend bis isolierend zu betrachten.

$$\dot{Q}_{leit} = -A * \lambda * \frac{\delta \vartheta}{\delta s} \quad (4.3)$$



**Wärmestrahlung** ist in den Bereichen mit Kontakt zur Luft (Poren, Umgebung) möglich und wird als vernachlässigbar im Vergleich zu der Wärmeleitung und Konvektion angesehen [12]).

**Konvektion** ist der Stofftransport in einem strömenden Fluid. Dies wird nach Ansicht der meisten Autoren als Hauptein- und Hauptaustragsweg für Wärmeenergie in Kompostierungsprozesse betrachtet (z.B. [12]). Dabei besteht der Massestrom der Prozessluft aus der trockenen Luft  $\dot{m}_L$  und Wasserdampf  $\dot{m}_D$ , Gleichung 4.4 [44] und deren Enthalpien  $\dot{h}_L$  und  $\dot{h}_D$ . Der Massestrom des Wasserdampfes nimmt beim Durchströmen des Kompostreaktors zu (Verdunstung, Erwärmung von Luft). Entsprechend zeigen Reaktoren mit hohen Belüftungsraten einen starken Wärmeaustausch über die Abluft. Die Konvektion bei unbelüfteten Reaktoren kann über eine Abschätzung des Kamineffekts erfolgen (Druckverlustbeiwert  $\zeta$  des Substrats, Temperaturdifferenz Umgebung zu Mittenmitte) [30] und über die Oberflächendiffusion der Gase in der Reaktorgrenze des Festbettreaktors ([57] in [43]).

$$\dot{Q}_{konv} = \dot{m}_L * \dot{h}_L + \dot{m}_D * \dot{h}_D \quad (4.4)$$

#### 4.1.2.4 Wärmeverlust

Bei offenen Festbettreaktoren bildet sich eine verpilzte Randzone, welche aufgrund des geringen Wassergehalts als Isolation betrachtet werden kann [3, 30]. [30] weist rechnerisch nach, dass die Oberflächentemperatur des Reaktors stets 1-5 K höher ist als die Umgebungstemperatur. Der Wärmeverlust durch Wärmeleitung, -strahlung und Konvektion (LSK)  $\dot{Q}_V$  über die Reaktoroberfläche im Verhältnis zum gesamten konvektiven Wärmestrom  $\dot{Q}_{konv}$  ist abhängig vom Oberflächen-Volumen-Verhältnis (A:V-Verhältnis) und den Umgebungsbedingungen (Wind). Untersuchungen mit belüfteten Reaktoren haben gezeigt, dass im Labormaßstab  $\dot{Q}_{konv}$  durch die Belüftung 36 % bis 67 % und  $\dot{Q}_V$  33 % bis 62 % des gesamten Wärmestroms beträgt. Versuche im Pilotmaßstab zeigen konvektive Wärmeverluste  $\dot{Q}_{konv}$  von 70 % bis 95 % des gesamten Wärmestroms und  $\dot{Q}_V$  von 3 % bis 15 %. [58]

### 4.1.3 Modellierung der Selbsterhitzung und Reaktionswärme

#### 4.1.3.1 Begriffsbestimmung

Die Selbsterhitzung beschreibt die Kinetik der Änderung der Temperatur  $\vartheta$  eines Substrats bis zu dessen Maximaltemperatur. Die Selbsterhitzungsfähigkeit ist ein Parameter zur Bestimmung des Reifegrades von Kompost mittels Dewar-Gefäß (z.B. [59]). Deswegen wird in dieser Arbeit der Begriff Reaktionswärme für den gesamten exothermen Zersetzungsprozess der Biomasse auch während der Reifephase verwendet.

In der Literatur existieren unterschiedliche Ansätze die Reaktionswärme zu modellieren. Deterministische Modelle verwenden Ursache-Wirkungs-Prinzipien mit meist mikrobiologischen Wachstumsmodellen (z.B. [49, 60, 61]). Black-Box-Modelle verwenden Bilanzierungen über meist stöchiometrische Gleichungen (z.B. [6, 30]). Auch Mischformen sind möglich (z.B. [62]).

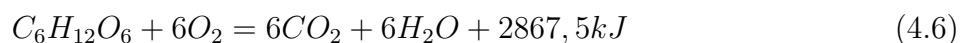
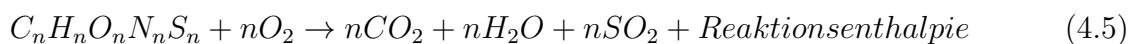
#### 4.1.3.2 Deterministisch geprägte Modelle

Zur Beschreibung der Reaktionswärme werden teilweise Wachstumsmodelle herangezogen. Der mikrobiologische Abbau der Substrat-Gemische ist selbst bei bekannten Input- und Output-Parametern zu komplex, als dass eine Beschreibung mit herkömmlichen Verfahren zielführend sein kann [63]. Die Art und Menge der beteiligten Mikroorganismen und deren Stoffwechselvorgänge sowie deren Interaktionen sind nicht vollständig nachweisbar. Daher ist die deterministische Modellierung dieser Prozesse auf Grundlage bekannter Ursache-Wirkungs-Beziehungen und der klassischen Kinetik im Einzelnen nicht möglich. Eine Übersicht, über die Entwicklung der Wachstumsmodelle für den aeroben Abbau von Abfällen ist dargestellt in [64]: Kinetik erster Ordnung bis zu einer Integration komplexerer Mechanismen, wie z.B. limitierende Nährstoffe und Interaktion mit Intermediärstoffen.

Teilweise wird zusätzlich zu den exothermen, mikrobiologischen Abbauprozessen die Oxidation von Cellulose mittels Arrhenius-Gleichung modelliert. [62] schlägt hierfür ein räumdiskretes Modell vor, welches für belüftete Reaktoren eine erste, passende Näherung liefert. Ein ähnliches Modell wird von [45] mit Experimenten von Grünschnitt-Kompost evaluiert und zeigt nach dem Parameterfitting eine gute Näherung zum Temperaturverlauf.

#### 4.1.3.3 Stöchiometrische Modelle mit Prozessgasen

Ist die chemische Formel für das Stoffgemisch bekannt ( $C, H, O, N, S$ ), kann über die Bilanzierung der Aufnahme von Sauerstoff und Abgabe von Kohlenstoffdioxid (siehe Gleichung 4.5) die Reaktionswärme abgeschätzt werden [65]. Beispielhaft ist dies für Glukose in Gleichung 4.6 dargestellt.



Nach [66] in [67] kann ein linearer Zusammenhang von Sauerstoffaufnahme und Reaktionswärme festgestellt werden ( $14,4 \pm 1,31 \text{ kJ/g}_{O_2}$ ). Die Korrelation der Reaktionswärme mit der Kohlenstoffdioxidabgabe ist weniger eindeutig und substratabhängig. Sie wird mit  $10,5 \pm 1,91 \text{ kJ/g}_{CO_2}$  angegeben. Dies entspricht einer Reaktionswärme von 22,2 bis 56,6 kJ/g<sub>C</sub>. Diese Größenordnungen konnten bei Feldversuchen bestätigt werden [67]. Experimente im Labor zeigten gute Übereinstimmungen mit Großversuchen durch die Bilanzierung des VOC [61].

#### 4.1.3.4 Abschätzung durch den Heizwert des Substrat

Die Reaktionswärme eines Substrats bei der Kompostierung kann trotz unterschiedlicher Degradationsmechanismen durch dessen Heizwert theoretisch angenähert werden [8, 12, 30, 68]. Zur Orientierung dienen folgende Angaben: Die Heizwerte der in Deutschland vorkommenden biogenen Festbrennstoffe unterscheiden sich in Bezug auf die Trockenmasse kaum und liegen

Tabelle 4.1: Heizwert, Massenanteil und Abbaugrad verschiedener Nährstoffe (Restabfall) [30]

j	Stoffgruppe	Heizwert $H_i$ [MJ/kg]	Abbaugrad $\eta$	Massenanteile $\xi$
1	Kohlenhydrate	ca. 16	0,85	0,7
2	Eiweiße	ca. 17	0,55	0,1
3	Fette	ca. 40	0,65	0,2

ungefähr zwischen 16,5 und 19 MJ/kg<sub>TS</sub> [69]. Heizwerte von Halmgutbrennstoffen liegen dagegen etwa 9% unter denen von Festbrennstoffen [69]. Die energetische Bewertung unterscheidet sich bezüglich des Wassergehalts: Ein erhöhter Wassergehalt ist die Voraussetzung für den biochemischen Zersetzungsprozess, aber kostenintensiver für die Verbrennung und Trocknung. Es kann davon ausgegangen werden, dass durch biochemische Zersetzung eine vollständige Freisetzung der Energie nur in Höhe des Abbaugrads  $\eta$  möglich ist.

#### 4.1.3.5 Abschätzung durch die Heizwerte der Nährstoffe

Die Freisetzung von Wärmeenergie geschieht in zeitlicher Abhängigkeit vom Abbaugrad  $\eta$  der einzelnen Nährstoffe im Substrat. In Anlehnung an [30] kann der Heizwert  $H_i$  durch die enthaltenen Nährstoffe mit Hilfe der Massenanteile  $\xi$  abgeschätzt werden (Tabelle 4.1) und durch die Gl. 4.7 berechnet werden:

$$H_{i,gesamt} = \frac{\sum_{j=1...3} \xi_j * \eta_j * H_{i,j}}{\sum_{j=1...3} \xi_j * \eta_j} \quad (4.7)$$

In Laborversuchen konnte festgestellt werden, dass der größten Anteil der Energiefreisetzung während der Heißbrötchen bei der Metabolisierung von Fetten freigesetzt wird. Die Fette konnten in diesem Versuch bis zu 85 % abgebaut werden [6]. Je nach Substratgemisch und Kompostierungsverfahren variieren diese Werte stark.

#### 4.1.4 Modellierung des Wasserhaushalts

Ein günstiger Wassergehalt ist eine Voraussetzung für den biochemischen Zersetzungsprozess und wird in Kombination mit dem Porenvolumen und der Belüftung für die Prozesssteuerung von Kompostierungsanlagen modelliert (z.B. [24, 25, 70]). Meist werden der Wassergehalt des Substrats, die Wasseranteile der Zu- und Abluft sowie die spezifische Wasserfreisetzung beim biologischen Abbau betrachtet. Selten werden Ereignisse wie Bewässerung bzw. Niederschlag, Sickerwasser oder Kondensat den an Einbauten modelliert [43]. Dabei vereinfachen diese Modellierungen eine Bewässerung oder den Niederschlag auf eine homogene Erhöhung des Wassergehalts im gesamten Reaktorraum.

## 4.2 Technologien zum Wärmeentzug aus der Kompostierung

### 4.2.1 Möglichkeiten des Wärmeentzugs

Die Auskopplung der Wärme aus der Kompostierung wird in dieser Arbeit als Wärmeentzug bezeichnet. Eine Unterscheidung der Möglichkeiten des Wärmeentzugs ist in Abbildung 4.3 dargestellt. Die meisten Systeme nutzen externe Wärmeübertrager (WÜ) in der Abluft der Reaktoren oder interne WÜ in der Biomasse. Die direkte Nutzung der Kompostierungswärme ohne WÜ ist z.B. in einem Gewächshaus möglich und bei [7] erläutert. Prinzipiell könnte die Wärme auch aus dem Sickerwasser oder der Wärmestrahlung gewonnen werden. Diese Möglichkeiten sind allerdings nicht effizient [3, 71, 72].

**Externe WÜ** in der Abluft haben den Vorteil, dass durch den Wärmeentzug keine Beeinträchtigung des biochemischen Zersetzungsprozesses stattfindet. Weiterhin ist der Aufbau eines externen WÜ unabhängig von dem Aufbau eines oder mehrere Festbettreaktoren und der Wärmeentzug ist somit flexibler möglich. Nachteilig ist die Kopplung der Belüftung mit dem Wärmeentzug. Es wird ca. 10 mal mehr Luft zum Abtransport der Wärme benötigt als zur Sauerstoffversorgung [68]. Zusätzlich dazu erfolgt im Festbettreaktor ca. 90 % der Wärmeabfuhr durch die Verdunstung von Wasser und ca. 10 % durch die Erwärmung der Luft [22]. Entsprechend müsste für einen effektiven Wärmeentzug der Belüftungsvolumenstrom größer sein als es für die Sauerstoffversorgung notwendig wäre. Würde dafür gekühlte, wassergesättigte Abluft zurückgeführt werden, um eine Austrocknung des Systems zu verhindern, könnte Wärmeabfuhr durch Verdunstung stattfinden. Um eine Beeinträchtigung des biochemischen Zersetzungsprozesses durch Austrocknung zu verhindern, muss dennoch eine Bewässerung in Belüftungsstromrichtung vorgesehen werden (vgl. Abb. 3.5). Die Steuerung erfolgt über die Temperatur- und Gaszusammensetzung der Prozessluft. Die technische Umsetzung ist vergleichsweise aufwändig und kostenintensiv, deswegen v.a. für Kompostierungsanlagen mit konstanten Stoffströmen geeignet.

**Interne WÜ** in der Biomasse haben den Vorteil, dass die Wärmeenergie unabhängig von der Sauerstoffversorgung entzogen werden kann. Deswegen würde die Belüftung nur auf die Sauerstoffversorgung ausgelegt werden. Damit wird weniger Wasser aus dem System ausgelesen als bei externen WÜ in der Abluft und eine Bewässerung entfällt. Nachteilig ist das inhomogene Temperaturfeld im Festbettreaktor, welches die biochemischen Zersetzungsprozesse beeinflusst. Wird die Wärme durch diese WÜ gewonnen, erfolgt die Wärmeübertragung vor allem durch Wärmeleitung ggf. auch durch Konvektion (vgl. Abb. 4.5). Aufgrund der mäßigen Wärmeleitfähigkeit des Substrats besteht bei internen WÜ die Gefahr der Vernässung an den WÜ, da dort Kondensation der Prozessluft stattfindet. Die Steuerung erfolgt über die Temperatur im Substrat ( $> 55\text{ °C}$ ). Die technische Umsetzung ist vergleichsweise simpel und kostengünstig, deswegen sind die internen WÜ eine Kompromiss-Lösung für den Wärmeentzug aus Anlagen mit geringen Stoffströmen und für geringe Wärmebedarfe.

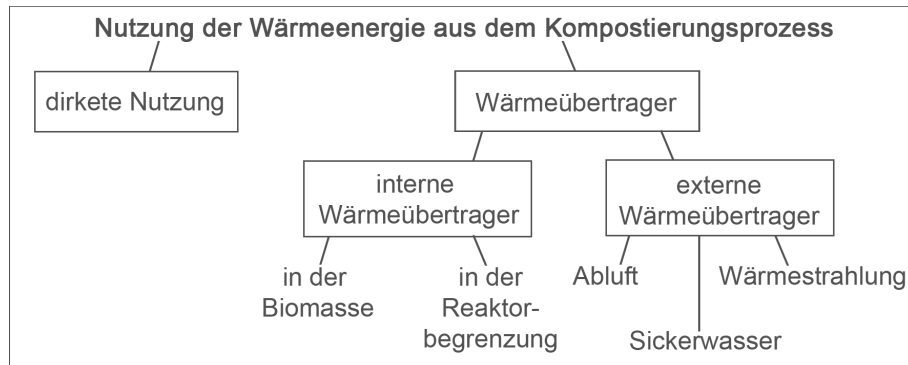


Abbildung 4.3: Möglichkeiten des Wärmeentzugs aus der Kompostierung

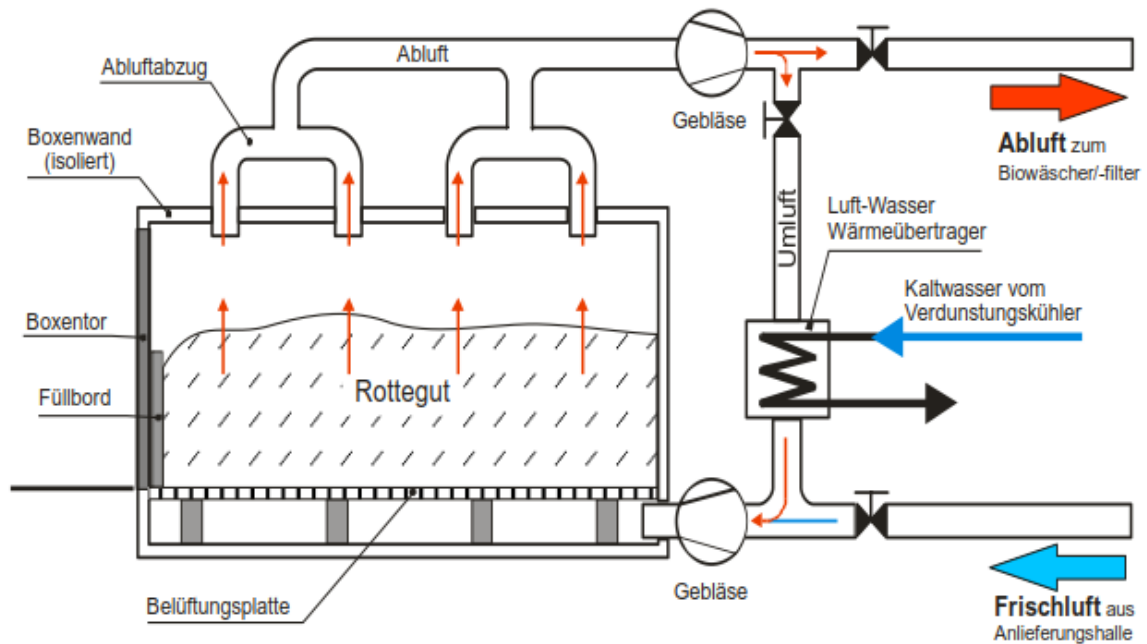
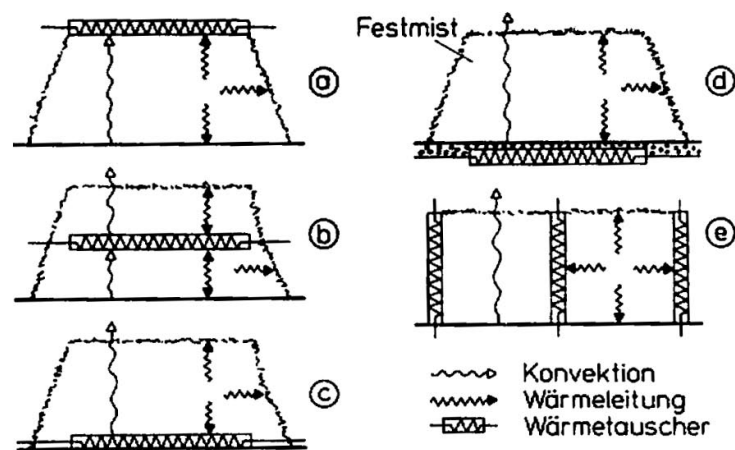


Abbildung 4.4: Herhof-Rottebox mit Wärmeentzug aus der Abluft, prinzipieller Aufbau [26]



Platzierung des WÜ a) auf der Miete b) im Substrat c) unter der Miete d) unter der Betonplatte  
unter der Miete e) in den Seiten und Zwischenwänden

Abbildung 4.5: Technisch einfache WÜ-Systeme zum Wärmeentzug am bsp. Festmist [67]

## 4.2.2 Steuerung der Prozesse

### 4.2.2.1 Bedeutung

Die Prozesse in Festbettreaktoren müssen gesteuert werden. Gründe dafür sind:

1. Ist die Reaktionsgeschwindigkeit zu niedrig, kann aufgrund der geringen Reaktionswärme  $\dot{Q}_R$  keine Wärmeenergie entzogen werden.
2. Ist sie zu hoch, kann ungenügend Wärmeenergie abtransportiert werden. Dies führt zum Wärmestau in dessen Folge die MO sterben und der thermophile Prozess endet. [12].

### 4.2.2.2 Belüftung

Belüftete Reaktoren ohne Sauerstofflimitation zeigen einen steileren Temperaturanstieg in der Selbsterhitzungsphase bis zur maximalen Temperatur und einen höheren Temperatur-Peak als Reaktoren mit Sauerstofflimitation. Dies ist auf eine ausreichende Sauerstoffversorgung des Mieteninneren während der exponentiellen Wachstumsphase der MO zurückzuführen. Geringe Belüftungsraten verlangsamen entsprechend den Prozess.

Eine Folge hoher Belüftungsraten besteht in der Austrocknung des Substrats ([73] in [13]) und in der Formierung bevorzugter Strömungswege (Kurzschlussströmungen, Randwegigkeiten). Da mit steigender Austrocknung die bevorzugten Strömungswege weiter begünstigt werden, formieren sich im Zeitverlauf im Substrat Gradienten an den Strömungswegen im Wassergehalt, in der Temperatur und im Abbaugrad ([74] in [75]). Entsprechend wird nicht die gesamte Biomasse homogen, exotherm abgebaut und die Steuerungsmöglichkeit des Prozesses kann nur durch mechanisches Einwirken wieder hergestellt werden.

### 4.2.2.3 C:N-Verhältnis

Die thermophile Phase des Kompostierungsprozesses wird bei einem C:N-Verhältnis von 30:1 schneller erreicht als bei weiten Verhältnissen (keine Stickstofflimitation in der Wachstumsphase, siehe Abschnitt 3.3). Einen weiteren Einfluss auf die Selbsterhitzung bis zum Erreichen der thermophilen Prozessphase hat die initiale MO-Population des Substrats [76, 77].

### 4.2.2.4 Temperaturführung

In Untersuchungen wurde gezeigt, dass die mikrobielle Aktivität höher ist, wenn die Temperaturregelung erst nach dem Erreichen des Temperatur-Peaks beginnt [6]. Da die Milieubedingungen für die MO erhalten werden müssen, darf nach der Selbsterhitzungsphase nicht mehr Wärme entzogen werden als durch die MO produziert wird [6]. In der Literatur zum Wärmeentzug aus der Kompostierung wird bei belüfteten Systemen das Absterben von MO bei Temperaturen  $> 65\text{ °C}$  angeführt, um die Temperatur auf ca.  $55\text{ °C}$  zu regeln [6, 78, 79]. Zu Biomeilern gibt es keine Untersuchungen für die Temperaturregelung. In der Praxis wird auch hier ein Wärmeentzug erst nach dem Erreichen der zu erwartenden maximalen Temperatur empfohlen [9].

### 4.2.3 Bestehende Verfahren zum Wärmeentzug aus der Kompostierung

#### 4.2.3.1 Kontinuierliche Verfahren

Kontinuierliche Verfahren nutzen die Wärme, die bei der Belüftung eines Stoffstroms entsteht. Sie zeichnen sich durch einen vergleichbar hohen Technologieeinsatz, hohen Steuerungsbedarf und hohe Investitionen aus. Sie werden dort angewendet, wo im Jahresverlauf gleichartiges, kompostierfähiges Material in großen Mengen anfällt, z.B. in Tierzuchten oder der Lebensmittelverarbeitung.

Es existieren vergleichsweise wenige Versuche, welche eine kontinuierliche Prozessführung nutzen, um aus **festen Substraten**, wie z.B. Gartenabfällen, Essensresten oder Festmist, Wärme zu gewinnen. Bisherige Veröffentlichungen im Maßstab von industriellen Implementierungen nutzen Fließbandverfahren ([2, 80–82]) oder eine Saugbelüftung („Negative Aeration“) im Boden des Mistspeichers von Tierhaltungen ([83, 84]) für den Wärmeentzug.

#### 4.2.3.2 Kurzzeit-Batch

Der überwiegende Teil der Technologien zum Wärmeentzug aus der Kompostierung nutzt die starke Wärmeentwicklung im ersten Teil des Rotteprozesses, der thermophilen Prozessphase. Neben den verschiedenen technischen Lösungen für Reaktoren, Wärmeübertrager und die Steuerung werden auch funktionelle Vorrichtungen zum Be-/Entladen, Sammelstellen und Logistik gebraucht. Entsprechend bedarf es vergleichsweise hoher Investitionen in Technik, Platz und Infrastruktur. [11]

Die verwendeten **Substrate sind Gemische** mit einem hohen Anteil leicht abbaubarer und dem notwendigen Anteil strukturgebender Materialien. Die Substratgemische müssen so aufbereitet sein, dass sie nach einer lag-Phase von 1-3 Tagen Temperaturen von  $> 60\text{ }^{\circ}\text{C}$  über meist 10-20 Tage erzeugen. Ist diese Aufbereitung möglich, sind viele verschiedene Substrate stofflich und energetisch nutzbar. Sie sind gut in konventionelle Kompostierungsanlagen integrierbar, da sie derselben Prozesssteuerung unterliegen.

Ein Überblick über existierende Technologien gibt Tabelle 4.2. Tabellarische Übersichten befinden sich zudem in [10, 13, 52, 85]. Durch den Parallelbetrieb mehrerer Reaktoren kann eine kontinuierliche Energieabnahme erfolgen. Die meisten Systeme nutzen einen geschlossenen Behälter als Reaktor und die Abluft als Wärmeträger. Durch die Anzahl der Untereinheiten, den Steuerungsbedarf und die Verweilzeit sind die meisten Systeme flexibel betreibbar und gut kontrollierbar. Die marktreifen Technologien nutzen Container als Reaktoren.

#### 4.2.3.3 Langzeit-Batch

Diese Verfahren zielen auf einen möglichst langen Wärmeentzug ( $> 5$  Monate). Sie nutzen dabei vornehmlich den thermophilen Teil des Kompostierungsprozesses. Zumeist handelt es sich um simple technische, zylinderförmige Systeme mit internen Wärmeübertragern. Als Belüftungssystem wird meist die passive Belüftung in Form einer Sohlbelüftung (siehe 3.5)

Tabelle 4.2: Verfahren zum Wärmeentzug während der aeroben, thermophilen Prozessphase

System	WÜ und WTM	Substrat	Quellen
Laborreaktor 0,1 m <sup>3</sup> , aktiv durchströmt	Abluft durch Füllkörperkolonne	Geflügelmist, Reiskleie, Sägemehl	[86]
Laborreaktor 0,23 m <sup>3</sup> , aktiv durchströmt	WÜ im Mantel	Klärschlamm, Sägemehl	[6]
Behälter (10 m <sup>3</sup> ), mit Rührwalzen, aktiv durchströmt	Abluft durch Turm-WÜ	Mist und Stroh	[2] in [87], [88] in [7]
Rottebox (2 - 54 m <sup>3</sup> ), aktiv durchströmt	Rohr-WÜ bzw. Nutzung der Abluft	organische Siedlungs- abfälle	[5, 85, 89– 91],
Rottebox (20 m <sup>3</sup> ), integriert in Gewächshaus	Wärmestrahlung und Ab- luftführung durch Erde	Festmist	[7]
Rottebox mit Rührer, aktiv durchströmt	Nutzung der Abluft	Biotonne Direktver- wertung vor Ort	[92] in [9]
LKW-Container, aktiv durchströmt	Verdampfer, Abluft	Nahrungsmittelabfall (Haushalt u. Gewerbe)	[93–95]
Tunnelkompostierung mit Lochbodenplatte	Rohr-WÜ im Abluftbereich über Rottegut, Wasser	Grünabfälle, Klärschlamm	[71]

gewählt. Dadurch sind die Investitionen in Technik und Logistik, der Wartungsbedarf und die Personalkosten deutlich geringer als bei kontinuierlichen oder Short-Batch Verfahren.

Die **Substratgemische** bestehen aus einem hohen Anteil strukturreicher, mittelschwer abbaubarer Stoffe, bsp. Holz und Grünschnitt. Das weite C:N-Verhältnis führt zu einem verzögerten Abbauvorgang mit ggf. Stickstofflimitation. Bei Festbettreaktoren, welche ausschließlich Grünschnitt als Substrat nutzen, ist die Partikelgröße entscheidend für den Abbauzeitraum: Einerseits limitiert sie die MO-Anzahl durch die aktive Oberfläche der einzelnen Partikel, andererseits wird die Belüftung des Reaktors verändert (Druckverlust).

Es existiert nur eine sehr geringe Anzahl wissenschaftlich dokumentierter Literatur zu diesen Verfahren. Einzelnachweise zeigen, dass eine Kompostmiete bis zu 18 Monate in der thermophilen Nachrotte bleiben kann [1, 4, 9, 96].

## 4.3 Datengrundlage zur Wärmeleistung

### 4.3.1 Ermittlung der Wärmeleistung

Die Wärmeleistung  $\dot{Q}_{nutz}$  beschreibt die durch einen Wärmeübertrager entziehbare Wärmeenergie aus dem Kompostierungsprozess. Hierzu gibt es kaum systematischen Untersuchungen [79]. Bereits gezeigt werden konnten Wechselwirkungen zum Kompostierungsprozess und dass ein zu hoher Wärmeentzug die thermophile Phase beenden kann ([97] in [13]).

[98] geht davon aus, dass theoretisch 90 % der entstehenden Wärmeenergie entzogen wer-



den kann. Andere Autoren bestätigen durch ihre Versuche eher 50-80 % [80, 87, 99]. Geringere Wärmeleistungen von ca. 15-35 % [6, 67] werden auf eine ineffiziente Betriebsweise zurückgeführt.

### 4.3.2 Experimente und Fehleranalyse

Die Durchführung von repräsentativen, mikrobiologischen Experimenten im Labormaßstab mit festen Substraten ist ein bisher nicht zufriedenstellend gelöstes Problem. Der Prozess muss so weit vereinfacht werden, dass er vergleichbar wird, und trotzdem die Komplexität des realen Prozesses widerspiegelt. Die meisten Veröffentlichungen gehen an unterschiedlichen Stellen im Versuchsaufbau Kompromisse ein, was die Ergebnisse mehr oder minder verfälscht. Da die für diese Arbeit notwendigen Grundaussagen aber erhalten bleiben, werden hier nur die grundlegenden Fehler diskutiert:

- Isolierung des Reaktors
- minimales Reaktorvolumen
- Belüftung
- Datenmenge

Wird eine Kompostierung in einem Reaktor ohne Isolierung (oder adiabates System, Temperaturnachführung) durchgeführt, ist der Verlust über die Außenwände so hoch ([6, 68]), dass sowohl die Temperaturmessung fehlerhaft ist, als auch der mikrobiologische Prozess im Kern gestört wird. Hinzu kommt, dass ein minimales, substratabhängiges Reaktorvolumen gewählt werden muss, um eine ausreichende Selbsterhitzung und ausreichende MO-Aktivität zu erreichen, welche den Bedingungen im Kern eines Festbettreaktors in Industriegröße entsprechen würde. Eine aktive Belüftung führt neben dem erhöhten Wärmeabtransport zu einer Selektion der MO aufgrund veränderter Milieuparameter. Ohne Referenzmessungen ist nicht feststellbar, ob die Belüftungsart/-rate für das Substrat geeignet ist. Aufgrund der verstärkten Durchströmung nimmt der Einfluss der Randgängigkeiten, des A:V-Verhältnisses und Korngrößenverteilung zu. [100, 101]

Zusätzlich zu den chemischen Parametern (C:N-Verhältnis, oTS, Wassergehalt etc.) ist die Angabe von den physikalischen Parametern (Schüttdichte, Porosität, Strukturstabilität, Partikelgröße) entscheidend, da sonst keine genauen Rückschlüsse auf den Kompostierungsprozess möglich sind. Für die Qualität der durchgeführten Versuche sind je nach Untersuchungsgegenstand Mehrfachbestimmungen für die Substratwerte (in Parallelbetrieb) bzw. mehrere Versuche im Pilotmaßstab durchzuführen [42].

### 4.3.3 Datengrundlage

Aufgrund der o.g. Komplexität sowohl bei der theoretischen Analyse der Wärmeleistung als auch bei der Durchführung von Experimenten im Labormaßstab ist die Datengrundlage gering.

In Tabelle 4.3 werden ausschließlich Daten einbezogen, welche aus Laborversuchen (Reaktoren  $> 300$  L) oder Feldversuchen gewonnen wurden und ein WÜ-System nutzen. Somit können Daten gewonnen werden, die nicht nur theoretisch möglich wären, in Versuchen beim Verbraucher ankamen. Die Versuche, welche auf Basis von Temperaturmessungen den Wärmeenergiegehalt von Substraten messen, werden an dieser Stelle nicht einbezogen.

Aus Tabelle 4.3 ist ersichtlich, dass die nutzbare Wärmemenge der Kompostierung  $Q_{nutz}$  einer Stoffgruppe aufgrund der eingesetzten Technologie stark variiert. Für die Auswertung werden die von den Autoren angegebenen Wärmemengen auf die Trockensubstanz ( $TS$ ) als  $q_{nutz}$  bezogen, sofern der Wassergehalt gemessen wurde. Die Werte befinden sich in Tabelle 4.4.

Deutliche Unterschiede existieren in der Zeit, in welcher die Wärmemengen entzogen werden. Dies wird durch die mittlere Wärmeleistung  $\dot{Q}_{nutz}$  beschrieben, ebenfalls auf die Trockensubstanz ( $TS$ ) bezogen als  $\dot{q}_{nutz}$ . Die Stoffgruppe mit vornehmlich Exkrementen setzt ihre Wärmemenge in 2-16 Tagen frei, die Stoffgruppe mit vornehmlich Siedlungsabfällen in 14-34 Tagen und mit reinem Grünschnitt in 6-8 Monaten. Unter Annahme einer kontinuierlichen, maximalen Wärmefreisetzung über den o.g. maximalen Zeitraum ergeben sich die in Tabelle 4.4 genannten substratspezifischen Wärmeleistungen  $\dot{Q}_{nutz}$  für die Kompostierung der jeweiligen Stoffgruppe.

## 4.4 Fazit

Es existieren vielfältige Ansätze zur Modellierung des Kompostierungsprozesses. Nur wenige sind komplex genug, um eine Vielzahl von Substraten, Reaktorenformen und Betriebsweisen (Belüftung) differenziert abzubilden. Selbst komplexere Modelle vernachlässigen dennoch grundlegende Aspekte, wie z.B. die raumdiskrete Verteilung der Zustandsgrößen und den Einfluss der Witterung, z.B. [43]. Dabei kann die Heterogenität der kompostierbaren Biomasse bezüglich ihrer Korngröße, Nährstoffverteilung und Vorbelastung (MO, Herkunft) generell nur mit starken Vereinfachungen modelliert werden. Nur in Einzelfällen werden Modelle validiert. Zusätzlich dazu existieren keine Modellierungen mit Fokus auf den Wärmeentzug und Verfahren ohne aktive Belüftung werden generell vernachlässigt.

### Schlussfolgerungen

Ein Erkenntnisgewinn aus den Modellierungsansätzen ist für die Fragestellungen dieser Arbeit nicht möglich. Aufgrund der Komplexität der Prozesse und des Stands der theoretischen Modellierung können keine neuen Voraussagen für unbelüftete Festbettreaktoren mit Rohrschleifen-Wärmeübertragern aus den Modellierungen getroffen werden.

Somit werden die Vorgehensweisen für die in dieser Arbeit gestellten Aufgaben aus Erfahrungswerten von Experten und aus den in Abschnitt 3 genannten Grundlagen abgeleitet. Deswegen fokussiert sich diese Arbeit auf eine erste systematische, empirische Untersuchung von Einflussfaktoren eines bisher unbeschriebenen Systems.

Tabelle 4.3: Wärmeentzug bei der Kompostierung bestimmter Substratgruppen

Stoffgemisch	$Q_{nutz}$ [MJ/kg]	C:N- Verhältnis	$W$ [%]	Verweil- zeit	Autoren
<b>Exkrement</b> $H_{Exkrement} = 18 \text{ MJ/kg}_{TS}$					
Festmist Schwein	12,8 (TS)	-	-	6 d	[2] in [3]
Mist, Stroh	9-11 (TS)	-	70-80	5-6 d	[87]
Festmist	4,2-8,4	-	-	5 d	[80] in [6]
Festmist Pferd	3,6 (TS)	-	76	8 d	[3]
Melasse, Stroh	4,5 (TS)	-	-	7 d	[67] in [3]
Harnstoff, Stroh	1,6 (TS)	60:1	75	16 d	[67] in [3]
Flüssigmist Rind, Styropor	2,3 (TS)	-	45	3 d	[67] in [3]
Flüssigmist Schwein, Styropor	3,9 (TS)	-	45	10 d	[67] in [3]
Flüssigmist Huhn, Styropor	5,1 (TS)	-	45	3 d	[67] in [3]
Klärschlamm, Sägespäne	0,6-0,8 (TS)	34-36:1	60-66	2 d	[6]
<b>Siedlungsabfälle</b> $H_{Bioabfall} = 12 \text{ MJ/kg}_{TS}$					
Biotonne, Grünschnitt, Schlämme	7	-	60	15-17d	[71]
Biotonne, Papier, Grünschnitt	4,6	12:1	27	34 d	[99]
Kompostierfähiges Material	3,6	-	50	21 d	[102] in [7]
Biotonne, Gartenabfälle	1,209	-	-	14 d	[5]
Biotonne, Grünschnitt	0,74	-	60	32 d	[103]
<b>Grünschnitt</b> $H_{Halmgut} = 16 \text{ MJ/kg}_{TS}$					
Grünholzschnitt	4,1	-	50	8 m	[104]
Grünholzschnitt, fein gehäckselt	4,3	-	-	6 m	[96], [1] in [4]
Grünholzschnitt, fein gehäckselt	2,3 (TS)	-	35	8 m	[4]
<b>Erde</b>					
Reifer Kompost	0,34	16:1	28	22 d	[99]

Tabelle 4.4: Substratparameter

Substrat	$q_{nutz}$ [MJ/kg <sub>TS</sub> ]	$\frac{q_{nutz}}{H_i}$ [%]	$\dot{q}_{nutz}$ [W/kg <sub>TS</sub> ]
Exkrement mit Puffermaterial	13	70	9,4
Siedlungsabfälle mit Puffermaterial	17	140	5,8
Reiner Grünschnitt	8	50	0,4

# 5 Methoden zur Vermessung der BM

## 5.1 Versuch

### 5.1.1 Versuchsfeld und Umgebungsbedingungen

Die Versuchsanlage besteht aus 11 Biomeilern zur Beheizung eines Hochbeets mit Pflanzen (Abb. 5.1). Die gesamte Anlage befindet sich in einer Senke des Schlossparks in Wittenberg (Abb. 5.2). Die Wälle der Senke sind im Nordwesten und Osten mit alten Bäumen bestanden, welche als Windbrecher und Schattenspende fungieren. Das Hochbeet befindet sich auf Wallhöhe. Entsprechend kann die **Sonne** und der **Wind** vor allem aus Süden auf die Biomeiler wirken. Die Biomeiler stehen teilweise in einem Abstand von  $< 1$  m, sodass ausschließlich die süd-westliche Front der Anlage und die Deckschicht der Sonne und dem Wind ausgesetzt ist. Das Hochbeet wird regelmäßig um 6 Uhr stark bewässert, sodass der Boden aufschlämmt. Von 8-20 Uhr wird im Rhythmus von 5 Minuten im Hochbeet Wasser versprüht. Das führt einerseits zu Tropfenbildung und dauerhafter Befeuchtung der angrenzenden Biomeileroberflächen und andererseits zur Erhöhung der **Luftfeuchtigkeit** sofern nur wenig Wind weht. Das aus den genannten Faktoren entstehende **Mikroklima** ist geprägt von wenig Luftbewegungen und einer hohen Luftfeuchtigkeit. Die Umgebungstemperatur zwischen den Biomeilern entspricht den Temperaturen auf Wallhöhe.

### 5.1.2 Aufbau und Betriebsweise der Biomeiler

#### 5.1.2.1 Aufbau und Sensorik

Der grundsätzliche Aufbau entspricht den empirischen Erfahrungen des Erbauers „Native Power“ und spiegelt den aktuellen Stand der Technologie wieder. In Abbildung 5.3 ist der prinzipielle Versuchsaufbau aller Biomeiler dargestellt. Es handelt sich um zylinderförmige Festbettreaktoren mit eingelegtem Rohrschleifen-WÜ in drei Schichten. Die Tabelle 5.1 gibt einen Überblick über die verwendete Technik und die Materialien. Beim Aufbau werden die Biomeiler unterschiedlich gewässert und die Wassermenge  $V_{ZH_2O}$  dokumentiert (siehe Anhang B.5). Die Durchmesser  $d_{BM}$  und die Höhen  $h_{BM}$  der Biomeiler variiert. Die Nomenklatur der Biomeiler ergibt sich aus der volumenabhängigen Größenkategorie (1 bis 4) und der Lage im Versuchsfeld von nord nach süd (A bis D), siehe Tab. 5.2 und Abb. 5.1.

Die **Aufbauart** wird beeinflusst durch Anzahl der Personen, welche den Aufbau durchführen. Entsprechend sind die Biomeiler insgesamt bzw. an den Rändern stärker komprimiert. Auch

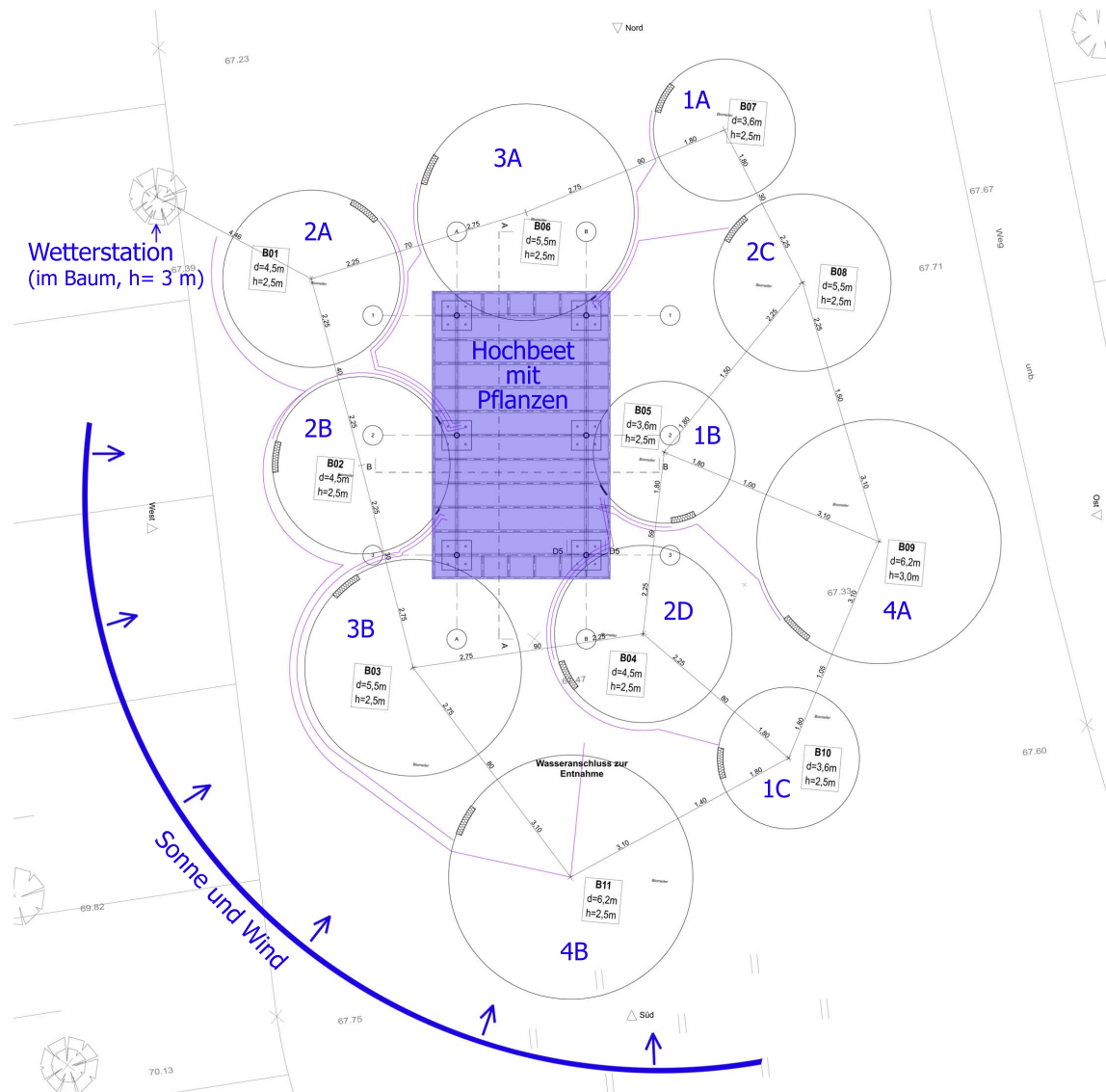


Abbildung 5.1: Lageplan der Biomeiler [105]



Abbildung 5.2: Versuchsfeld: Baumumstandene Senke im Schlosspark der Stadt Wittenberg, Blick nach Norden mit Hochbeet und Baustelle der ersten Biomeiler

ist eine Fehlerbetrachtung zum Wasserzusatz  $V_{ZH_2O}$  notwendig, da teilweise zwei Biomeiler parallel aufgebaut werden und zusätzlich Wasser auf der Baustelle verbraucht wird. Die Dokumentation und Fehlerrechnung dazu befinden sich in Abschnitt B.4 und C.4.

Die Rohrschleifen werden in einer Konsole **in Reihe geschaltet** mit dem Durchfluss  $\dot{V}_{BM}$  von der unteren WT-Schicht zur oberen WT-Schicht. In der Konsole werden folgend Pumpenvorfilter, Pumpe und Durchflussmesser angeschlossen. Jeder Biomeiler besitzt seinen eigenen Kreislauf (Abb. 5.4a) mit jeweils unterschiedlicher Wärmeabnahme (Pflanzen im Hochbeet). Die **Sensorrohre für die automatisierte Temperaturmessung** liegen direkt unter dem WÜ der jeweiligen Schicht. Nach dem Aufbau werden die Sensoren in die Sensorrohre eingeschoben bis Kontakt zum Substrat besteht. Die Sensoren liegen deswegen generell ca. 5 cm unter der WÜ-Schicht. Allerdings besitzen sie aufgrund der WÜ-Form einen unterschiedlichen, nicht definierten Abstand zu den WÜ-Rohren. Der Mittensensor liegt meist in der mittleren Schicht  $h_m$  in Radius-Tiefe  $s_r$ . Einen Überblick zu Sensorhöhen  $h$  und -tiefen  $s$  gibt Tabelle 5.3. In Abbildung 5.4b sind alle automatisiert abgefragten und manuellen Messpunkte (MP) dargestellt.

#### 5.1.2.2 Substratvorbereitung

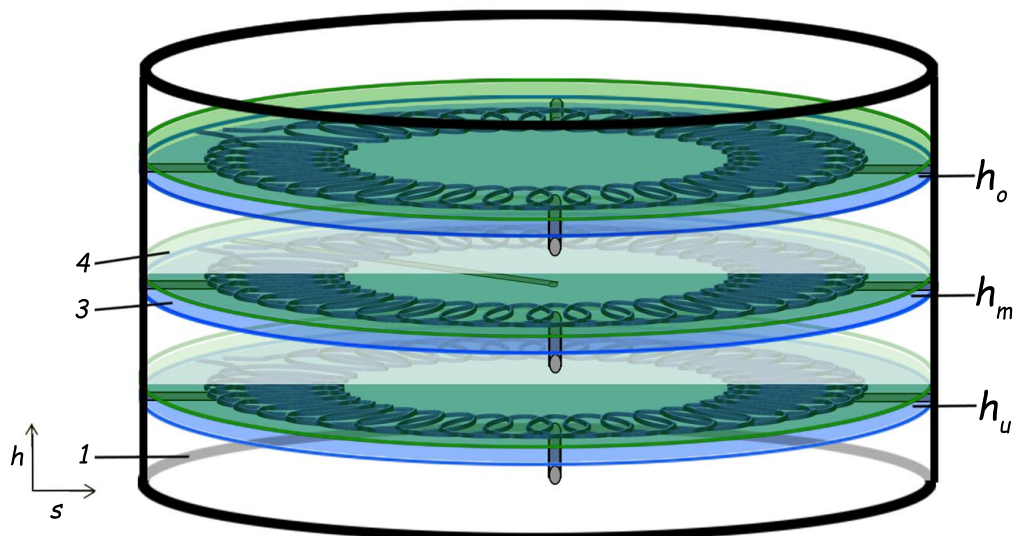
Das Substrat stammt aus einem Kompostwerk der Firma ALBA in Vockerode bei Wittenberg. Es wird über einen Zeitraum von zwei Monaten (März-April) von Kleinzulieferern gesammelt und zu einer bis ca. 2 m hohen Miete aufgeschichtet (Abb. 5.5a). Es enthält Gras, Grünschnitt, Stroh, Gartenabfälle, Plastikanteil und ist zum Aufbauzeitpunkt bereits im **Zersetzungsprozess**. Parallel zum Aufbau der Biomeiler wird das Substrat mit einem Schredder der Firma Doppstadt mit Korbweite 180 geschreddert (Abb. 5.5b). Nach dem Schreddern wird es direkt zum Versuchsfeld transportiert und am Wall abgeladen (Abb. 5.6a). Dabei rollt es den Hang hinab. Mit Hilfe eines Radladers wird das aufgeschüttete Substrat den Wall weiter hinunter geschoben (Abb. 5.6b). Aufgrund der diversen, verteilten Materialarten und der Schritte des Schredderns, Auf- und Abladens und Überschiebens kann das Substrat als **gemischt** und als **gleichartig** für den Versuch angesehen werden.

#### 5.1.2.3 Steuerung des Wärmeentzugs

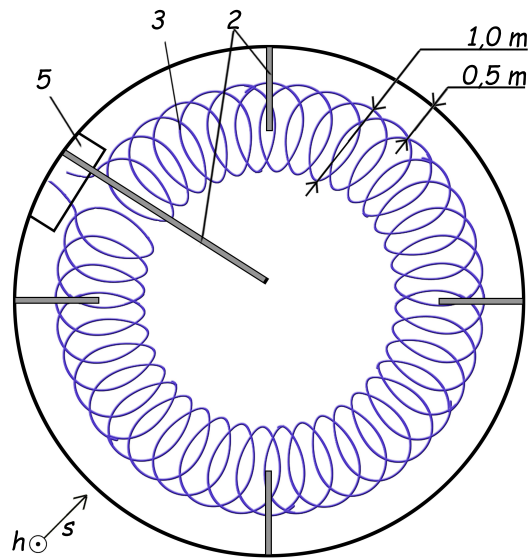
Nach dem Aufbau werden die Pumpen zentral und unabhängig von Vor- und Rücklauftemperatur durch Ein- und Ausschalten gesteuert. Eine Übersicht über die eingestellte Nennleistung der Pumpen und deren Laufzeiten befindet sich in Abbildung 5.7.

10 Tage nach dem Aufbau der ersten Biomeiler werden die Pumpen auf höchster Stufe für den Spülkreislauf betrieben, um Luft aus dem Rohrschleifen-WÜ zu verdrängen. Das sind 4 Tage nach dem Aufbau der letzten BM 4A, 4B und 1C. Deswegen wird die thermophile Phase dieser Biomeiler nicht erreicht (vgl. Abschnitt 3.4.1). Danach erfolgt der Wärmeentzug zunächst kontinuierlich und nach 40 Tagen im 12-Stunden-Rhythmus von jeweils 21 Uhr abends bis 9 Uhr morgens.



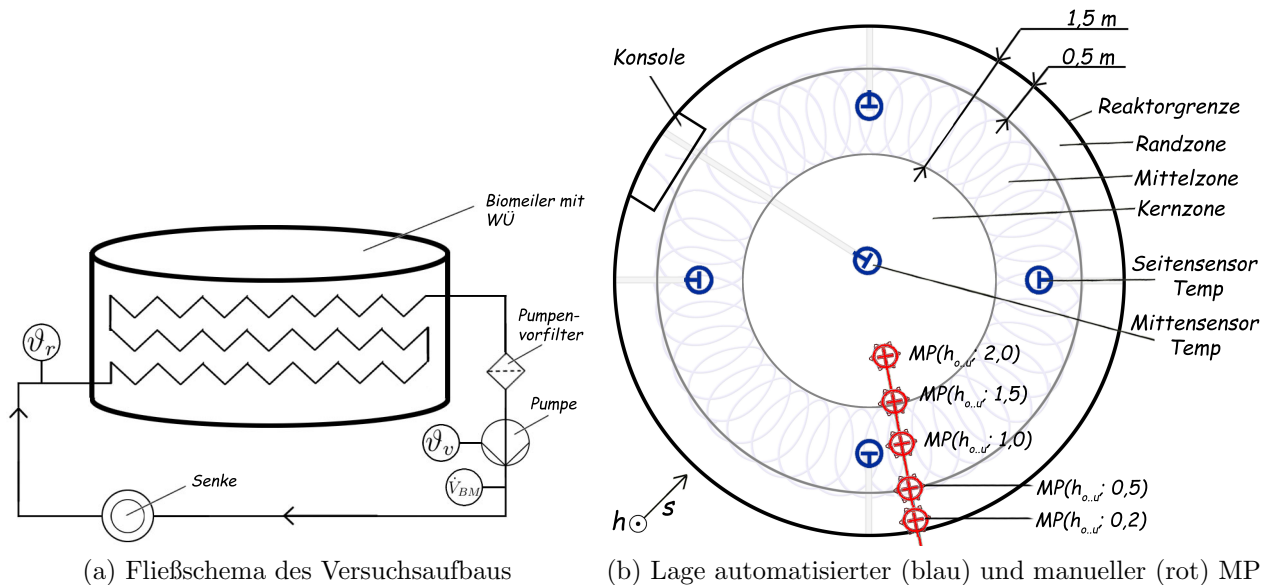


(a) Seitenansicht


(b) Schnittebene  $h_m$ 

- 1 - Substrat
- 2 - Sensorrohre
- 3 - WÜ-Ebene mit Biomassekontakt (blau)
- 4 - Silonetz-Ebene (grün)
- 5 - Konsole

Abbildung 5.3: Prinzipieller Aufbau der Biomeiler in horizontalen Schichten



(a) Fließschema des Versuchsaufbaus

(b) Lage automatisierter (blau) und manueller (rot) MP

Abbildung 5.4: Fließschema und Messpunkte

Tabelle 5.1: Übersicht der wichtigsten Bauteile

Funktion	Bezeichnung	Spezifikation
WÜ	PE Druckrohre PN16, DN25, 100 m	DIN EN 12201
Sensorrohre Seite	Regenrinne Fallrohr, DN 53, ca. 1 m	
Sensorrohre Mitte	PE Druckrohr PN 16, 2 - 3 m	
Silonetz	Zill tec 240	240 g/m <sup>2</sup> , Fadenstärke 0,42 mm
Pumpenvorfilter	Berlan 27819 BPVF-5	5“-3000 L/h
Pumpe	AVAG-Pumpen Delta HE 35 – 25	3-stufig: 4, 13 oder 22 W
Durchflussmesser	DE-07-MI001-PTB010 von HS-Systementwicklung	$Q_n$ 2,5 m <sup>3</sup> /h, $T_{max}$ 90 °C

Tabelle 5.2: Maße, Fertigstellung, Wasserzufuhr und Aufbaudetails aller Biomeiler

Baunr.	Bezeichnung		Durchm. $d$ [m]	Höhe $h_{BM}$ [m]	Volumen $V_{BM}$ [m <sup>3</sup> ]	Fertig- stellung	Aufbau- zeit [d]	Aufbau- art	Personen- anzahl	Wasser- zusatz [m <sup>3</sup> ]
B07	1	A	3,45	2,3	21,5	27.04.17	1	I	1	1,21
B05		B	3,5	2,7	26,0	30.04.17	1	II	1	1,405
B10		C	3,4	2,5	22,7	04.05.17	2	II	2	1,71
B01	2	A	4,5	2,5	39,8	26.04.17	2	I	3	3,94
B02		B	4,3	2,7	39,2	27.04.17	1	II	1	2,26
B08		C	4,4	2,5	38,0	29.04.17	2	II	2	3,43
B04		D	4,2	2,5	34,6	29.04.17	2	I	1	3,12
B06	3	A	5,0	2,5	49,1	26.04.17	2	I	3	4,86
B03		B	5,3	2,5	55,2	02.05.17	3*	II	2	2,98
B11	4	A	5,7	2,5	63,8	03.05.17	2	II	2	5,06
B09		B	6,0	3	70,7	04.05.17	2	II	2	6,28

*Legende: Kategorie I - Ränder schichtweise festgetreten; Kategorie II - Ränder als lose Schüttung; \* - Deckschicht nach einem Pausentag aufgetragen*

Tabelle 5.3: Position der Temperatursensoren in den Biomeilern

Bezeichnung		Seitensensoren Tiefe $s$ [m]	Seitensensoren Höhe $h_{u..o}$ [m]			Mittensensor Tiefe $s$ [m]	Mittensensor Höhe $h_{u..o}$ [m]
			$h_u$	$h_m$	$h_o$		
1	A	1,08	0,70	1,25	1,70	2	1,25
	B	0,94	-	1,20	-	2	1,20
	C	0,94	-	1,00	-	2	1,00
2	A	1,08	0,60	1,20 <sup>1</sup>	1,60	2	1,20 <sup>1</sup>
	B	1,08	0,60	1,10	1,65	2	1,10
	C	0,94	0,60	1,10	1,65	2	1,10
	D	0,94	0,70	1,20	1,60	2	1,20
3	A	1,08	0,90 <sup>3</sup>	1,35 <sup>3</sup>	1,75	3	1,75 <sup>2</sup>
	B	0,94	0,70	1,20	1,70	3	1,20
4	A	ca. 1,0	-	1,20	-	ca. 3	1,20
	B	ca. 1,0	-	1,00	-	3	1,00

*Legende: 1 - unter Silonetz; 2 - in Oberschicht; 3 - nachträglich eingestochen*





(a) Substratsammlung Vockerode



(b) Doppstadt-Schredder

Abbildung 5.5: Substratgeschichte und -zerkleinerung



(a) Abladen des Containers auf Wall



(b) Überschieben des Substrats

Abbildung 5.6: Durchmischung des Substrats am Versuchsfeld

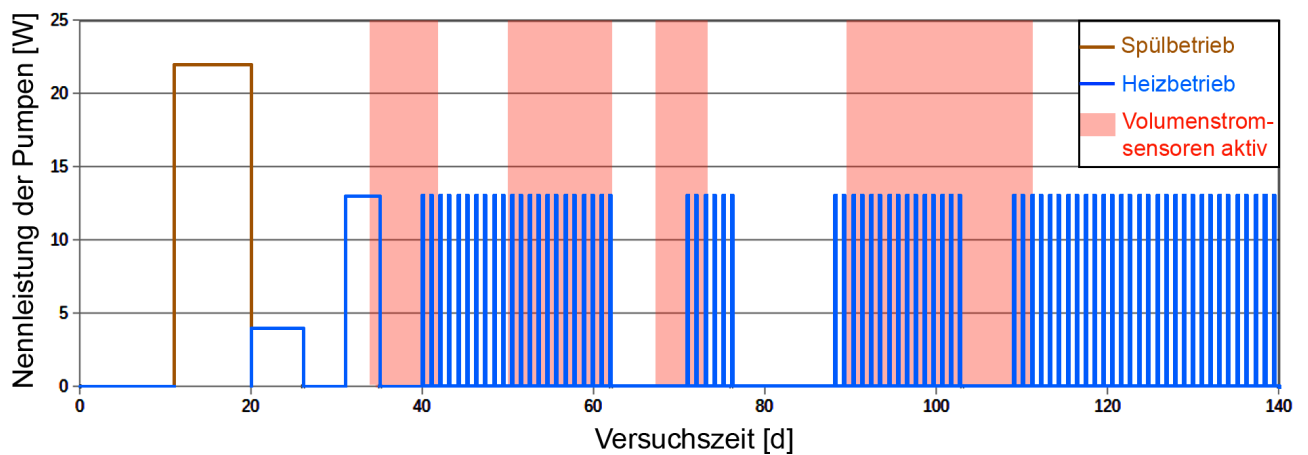


Abbildung 5.7: Pumpenlaufzeiten und Nennleistungen im Versuchszeitraum

### 5.1.3 Versuchszeitraum

Die Weltausstellung findet vom 05.05. - 15.09.2017 statt. Jeweils 2 Wochen davor und danach werden die Biomeiler auf- bzw. abgebaut. Aufgrund der unterschiedlichen Zeitpunkte der Fertigstellung variiert die Versuchsdauer je nach Biomeiler zwischen 135 und 155 Tagen. Die Angaben zu den Aufbaudaten sind in Tabelle 5.2 dokumentiert. Es wird mit einer mittleren Versuchszeit von 140 Tagen gerechnet, beginnend ab dem 27.04.2017.

## 5.2 Messungen

### 5.2.1 Charakterisierung des Substrats

#### 5.2.1.1 Probenahme und Messpunkte

Die Probenahme des **Substrats** erfolgt parallel zum Aufbau aus dem Substratlager (Abb. 5.6b) an zwei Tagen. Dabei wird das Substrat an jeweils 25 Stellen aufgegraben und Biomasse entnommen und vermischt. Ein Teil der Biomasse wird zur Schüttdichtemessung verwendet. 2,9 bzw. 2,7 kg der gewonnenen Probe werden vakuumverpackt und ins Labor gegeben. Die Probenahme des **Produkts** (Kompost) erfolgt parallel zum Abbau nach 145 Versuchstagen aus BM 4A und 4B. Die Proben werden aus drei Messpunkten (*MP*) aus jeweils 20 verschiedenen Stellen entnommen (Abb. 5.8a).

Die Identifizierung der Position einer Messung erfolgt mit Hilfe der Himmelsrichtungsangabe der Messstelle (*MS*) und des Messpunktes im Reaktorraum wie folgt:

$BM < \text{Bezeichnung} > MS(< \text{Himmelsrichtung} >) MP(< \text{Höhe} >; < \text{Einstehtiefe} >)$

Beispiel: *BM 2A MS(OST) MP(1,70; 0,2)*

#### 5.2.1.2 Schüttdichtemessung

Drei Gefäße werden für die Methodenentwicklung zur Bestimmung der Anfangsschüttdichte des **Substrats** getestet (Abb. C.1). In Abschnitt C.1 sind die Ergebnisse dargestellt und ausgewertet. Die Messungen in einem Kübel mit dem Durchmesser 0,55 m erzielen reproduzierbare Ergebnisse. Zusätzlich dazu wird die Komprimierung der Schüttdichte *K* gemessen. Hierfür wird die Biomasse im Kübel schichtweise mit 60 kg verdichtet. Die Ergebnisse sind in Tabelle B.3 aufgetragen.

Zur Erstellung eines **Schüttdichteprofiles** werden beim Abbau aus fünf Schichten jeweils 10 Bohrkern gewonnen (Abb. 5.8b). Mittels Universal-Lochsäge ( $d = 100 \text{ mm}$ ,  $h = 38 \text{ mm}$ ) wird senkrecht zur Oberfläche in den Boden gesägt. Ist die Oberkante der Lochsäge auf derselben Höhe wie die Oberfläche der Schnittebene, wird der Sägevorgang gestoppt. Der Bohrer, Lochsäge und Substrat werden zusammen gewogen. Schwierigkeiten bestehen in Schichten mit sehr grobem Material, da die Äste die Bodenstruktur zerstören und das geringe Probenahmenvolumen die Messung verfälschen kann.

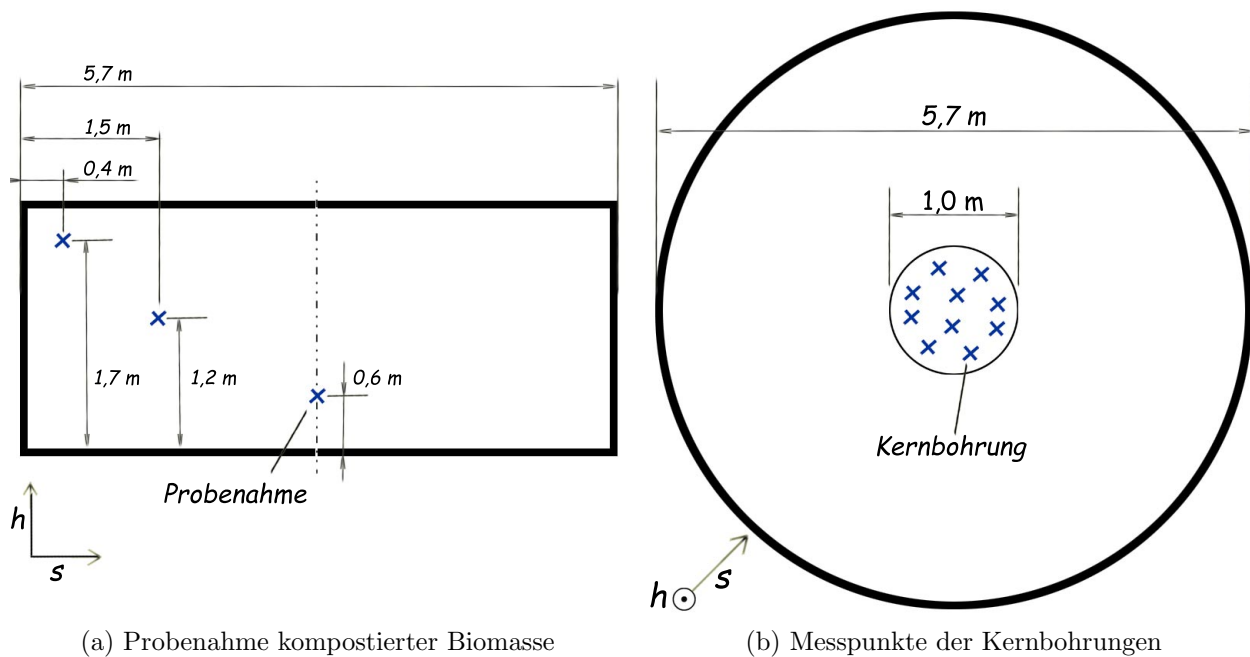


Abbildung 5.8: Messstellen für kompostierte Biomasse

### 5.2.1.3 Laboruntersuchungen

Zur Bestimmung der **Trockensubstanz** ( $TS$ ) wird der Inhalt eines Probebeutels auf eine Keramischschale gegeben und bei  $105\text{ }^{\circ}\text{C}$  im Ofen getrocknet. Jeweils vor dem Befüllen, vor dem Trocknen und nach dem Trocknen wird das Gefäß mit einer Schalenwaage (Messgenauigkeit  $\pm 0,01\text{ g}$ ) vermessen (Tab. B.4).

Die getrocknete Biomasse wird einem **Siebturm** (Retsch Vibrationssiebmaschine AS 200, ISO 3310-2) zugeführt und in jeweils vier Läufen ohne Wiederholung durchgeseiht (Tab. B.7). Die einzelnen Siebe werden mit den Fraktionen vermessen. Damit ergibt sich Messgenauigkeit für die Messung von der Waage mit  $\pm 0,01\text{ g}$ .

Für die Bestimmung der **organischen Trockenmasse** ( $oTS$ ) wird die Biomasse der Siebfractionen gemahlen, nochmals getrocknet und bei  $550\text{ }^{\circ}\text{C}$  im Tiegel geglüht (Tab. B.9). Die Messgenauigkeit ergibt sich auch hier aus der Waagengenauigkeit mit  $\pm 0,0001\text{ g}$ . Für die Bestimmung des  $oTS$  der gesamten Biomasse werden die  $oTS$  der Siebfractionen ihrem Korngrößenanteil entsprechend aufsummiert. Zur Konservierung wird das getrocknete, gemahlene Substrat bei  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  gekühlt.

Die **Elementaranalyse** des Substrats nach DIN EN 15104 erfolgt am 10.08.2017. Es ist anzunehmen, dass bis dahin Probeveränderungen stattgefunden haben. Aufgrund der Konservierung werden die Ergebnisse dennoch als geeignet für die Auswertung bewertet.

Die Bestimmung des **Heizwerts** erfolgt durch das BK-Labor im DBFZ nach DIN EN 14918 am 14.09.2017. Die Ergebnisse werden aufgrund der Konservierung für die Auswertung verwendet.

## 5.2.2 Temperaturmessungen

### 5.2.2.1 Automatisierte Temperaturmessungen

Die Temperatur im Festbettreaktor wird durch Sensoren Typ Ds18B20 (1-Wire-Bus) von Maxim Dallas ab dem 35 Versuchstag automatisch abgefragt. Dazu werden beim Aufbau Sensorrohre jeweils unter die WÜ gelegt (siehe Abb. A.1 und 5.4). Die Höhe  $h_{o..u}$  variiert je Biomeiler und ist in Tabelle 5.3 angegeben. Durch nicht-winkelrechtes Einlegen der Rohre kann von einer Abweichung von  $\pm 0,05$  m in alle Richtungen ausgegangen werden. Die Temperatursensoren werden in PVC-Hüllen verklebt und in die Sensorrohre bis zur Biomasse geschoben. Danach werden die Sensorrohre mit Schaumstoff abgedichtet. Das garantiert, dass die Leitung zum Sensor intakt bleibt (Setzung, Säuren) und die Messung nicht verfälscht wird.

Die Messtechnik wird von der Firma „Green Energy Monitoring“ bereitgestellt und betreut. Das System nutzt einen **Raspberry Pi** und eine Online-Datenbank zur Datensicherung. Der Abfragerhythmus beträgt 120 s. Die Biomeiler werden jeweils mit 15 Temperatursensoren ausgestattet: <sup>1</sup>

- 12 Sensoren: 4 Himmelsrichtungen in ca. 1 m Tiefe  $s$  in 3 Höhen  $h_{o..u}$
- 1 Sensor: Mittensensor in Tiefe  $s_r$  in mittlerer Schicht  $h_m$
- 2 Sensoren: Zu- und Rücklauf

Die Sensoren werden mit einer generellen **Messgenauigkeit** von  $\pm 0,5$  K angegeben. Die Sensoren von Zu- und Rücklauf werden kalibriert. Der Fehler wird auf  $\pm 0,1$  K geschätzt. Zusätzlich zu den systematischen Fehlern ereignen sich Ausfälle in der Datenübermittlung durch die Strom- und Spannungsversorgung des Systems, Kabelbrüche durch Setzung oder organische Säuren. Die Daten einiger Sensoren zeigen besonders häufig Sprünge, hier wird die Korrosion und damit verbundene Spannungsveränderung einer Kabelverbindung vermutet.

### 5.2.2.2 Manuelle Temperaturmessungen

Weiterhin werden manuelle Messungen mittels Temperaturlanze (GTH 1100 Digitalthermometer Greisinger Electronic) wöchentlich parallel zur Gasmessung durchgeführt, um die Temperaturen zwischen den WT-Schichten zu messen. Die Verteilung der Messwerte ergeben das Temperaturfeld, sichtbar im vertikalen Profil (Abb. 5.4b). Hier beträgt die Messgenauigkeit lt. Hersteller bei  $> 30$  °C  $\pm 1$  K. Die Einstichtiefe  $s$  variiert aufgrund der heterogenen Oberflächenstruktur der Mantelfläche des Biomeilers um  $\pm 0,010$  m. Die Länge der Lanze beträgt 1,5 m. Messungen in  $MP(h_{o..u}; 1,5)$  werden in frisch gestochenen Gaslanzenlöchern durchgeführt. Aufgrund des fehlenden Substratkontakts und hohen Temperaturdifferenzen kann es besonders in der oberen Schicht  $h_o$  zu einem Messfehler von 0,5 K kommen, siehe Tab 5.6. Die Messpunkte entsprechen denen der Gasmessung und sind in Abbildung 5.4 dargestellt.

<sup>1</sup>Ausnahmen bilden BM 1B, 1C und 4A, 4B. Diese besitzen Temperatursensoren in den 4 Himmelsrichtungen nur unter der mittleren WÜ-Schicht - insgesamt 7 Temperatur-Sensoren.

### 5.2.2.3 Messung der Oberflächentemperatur

Zur Messung der Oberflächentemperatur wird eine Wärmebildkamera FLIR E50 mit Messbereich  $-20$  bis  $650$  °C verwendet. Die Genauigkeit einer solchen Messung hängt stark von dem Emissionsgrad  $\varepsilon$  ab. Dieser variiert mit der Temperatur, Farbe und dem Wassergehalt des zu vermessenden Objekts. Für Holz beträgt er bei Temperaturen bis  $40$  °C  $0,80 - 0,90$  [106]. Dies entspräche einer Temperaturdifferenz von  $\pm 1$  K. Für die Messung der Oberflächentemperatur der Biomeiler wird  $\varepsilon 0,85$  verwendet. Als Vereinfachung wird angenommen, dass die reflektierte Oberflächentemperatur der Umgebungstemperatur zum jeweiligen Zeitpunkt  $\vartheta_U(t)$  entspricht. Die Messungen erfolgen am Morgen vor Sonnenaufgang oder in der Nacht. Bei Nah-Aufnahmen von  $1 - 2$  m zum Objekt erfolgt die Aufnahme senkrecht zur Oberfläche.

### 5.2.3 Volumenstrommessung im Heizkreislauf

Der Volumenstrom wird mit einem Durchflussmesser (53 Impulsen/L) wie in Abb. 5.4a gemessen. Der absolute Fehler ergibt sich aus den Impulsen zu  $0,02$  L/Impuls. Entsprechend ist der Fehler bei höherem Durchfluss  $\dot{V}$  größer.

Die Impulse werden von einem Mikrocontroller gezählt und im Abfragerhythmus von ca.  $300$  s an den Raspberry Pi übermittelt. Der Abfragerhythmus der Vor- und Rücklauftemperatur erfolgt nicht parallel zu den Impulsen des Durchflussmessers. Der sich daraus ergebende Fehler wird aufgrund der Trägheit des Systems vernachlässigt.

### 5.2.4 Messung der Gaszusammensetzung im Festbettreaktor

Das Probegas wird mittels einer **Substratmesslanze** von UGT GmbH genommen (Abb. 5.9a). Die Luftkontaktfläche zum Substrat wird durch einen, über dem Messraum befindlichen Konus gegen das Eindringen von Fremdluft abgedichtet. Dabei wird das Gas durch eine hydraulische Pumpe bzw. Unterdruckerzeugungseinheit angesaugt bis der Schlauch gefüllt ist (ca.  $2$  L Luft). Danach vermisst der Biogas-Monitor (ATEX BM2000, Abb. 5.9b) das Probegas durch Umstellen eines Ventils direkt aus der Messstelle. Die Gaskonzentration  $G$  von  $O_2$ ,  $CO_2$  und  $CH_4$  wird erfasst (Messbereich  $0-100$  % für  $G(CH_4)$  und  $G(CO_2)$ , Infrarotabsorption).

Im wöchentlichen Rhythmus wird die Gaskonzentration in den BM 2A-D vermessen. Dabei wird die Substratmesslanze seitlich in drei Höhen ( $h_o$ ,  $h_m$ ,  $h_u$  orientiert an den WÜ-Schichten, Abb. 5.3) in  $0,2 - 1,5$  m Tiefe  $s$  eingestochen (Abb. 5.4b). Für die Profilmessungen werden weitere Messpunkte in  $s = 2$  m und von der BM-Deckfläche beprobt.

Die Einstichtiefe  $s$  variiert aufgrund der heterogenen Oberflächenstruktur der Mantelfläche des Biomeilers um  $\pm 0,01$  m. Die vorhandenen Quer-Markierungen auf der Lanze verhindern zusätzliche Messfehler. Die **Messpunkte** sind in Abbildung 5.4b eingezeichnet. Die Messpunkthöhe variiert im Versuchszeitraum mit dem Volumenschwund des Substrats:

- in der oberen Schicht  $h_o$  um  $20-40$  cm
- in der unteren Schicht  $h_u$  um ca.  $5$  cm





(a) Einheit der Gasmesslanze



(b) Biogasmonitor

Abbildung 5.9: Geräte der Gasmessung

**Schwierigkeiten** bei den Messungen liegen in der Menge des Probengasvolumens. Zum Beispiel durch hohe Schüttdichten im Kern des Biomeilers oder besonders feuchte Schichten (bsp. zwischen den WÜ-Rohren) ist es nicht möglich, genügend Probevolumen für die Analyse zu ziehen, da kein oder wenig Luftporenvolumen vorhanden ist. Beim mehrfachen Einstechen der Lanze (bsp. bei Verstopfung der Lanzenspitze) kann es dazu kommen, dass Luft aus dem Einstichkanal gezogen wird und die Messungen verfälscht. Diese Fehler werden im Versuchszeitraum identifiziert, vermieden und sind in den Messergebnissen gekennzeichnet, mit entsprechenden Fehlerbalken versehen (siehe Tabelle 5.6) oder werden bei einer Plausibilitätsüberprüfung sondiert. Beim Einstechen der Lanze von der Zylinderoberseite oder der Mantelfläche ergeben sich Abweichungen bei demselben Messpunkt aufgrund unterschiedlicher Zugrichtungen der Lanzenspitze (parallel oder senkrecht zur Reaktorgrenze). Dies führt v.a. bei der Kombination der Messergebnisse zu Unstetigkeiten im Verlauf. Bei Messungen an windexponierten Stellen und der oberen Schicht  $h_o$  oder von der Deckfläche lassen sich bis in 0,2 m Einstechtiefe Schwankungen in der Gaskonzentration in Abhängig von der Windstärke nachweisen.

### 5.2.5 Messung der Wetterdaten

Die Wetterdaten werden direkt am Versuchsfeld von einer Wetterstation Typ WH1080 gemessen. Die Sensoren befinden sich auf einem süd-ost Ast auf Höhe des Hochbeets in einem Urwaldmammutbaum (Ort siehe Abb. 5.1). Gemessen werden Umgebungstemperatur  $\vartheta_U$ , Windrichtung, Windgeschwindigkeit  $w$  und Niederschlag. Aufgrund der Aststruktur wird davon ausgegangen, dass es nur wenig Beeinträchtigung der Windgeschwindigkeitsmessung gibt. Allerdings kann nur bei Starkregen Niederschlag zum Sensor vordringen. Somit wird bezüglich

des Niederschlags auf die Wetterdaten des Deutschen Wetterdienstes der Stadt Wittenberg zurückgegriffen.

Die Windrichtungsmessung wird bestimmt nach dem Polarwinkel. Zur Richtungsangabe wird die 360°-Skala verwendet mit Intervallen von 20 - 30°. Der maximale absolute Fehler ergibt sich somit zu 15°. Die Windgeschwindigkeitsmessung basiert auf der Anzahl der Umdrehungen eines Rotationselements pro Sekunde. Aufgrund des Abfragerhythmus ergibt sich der Fehler hier zu  $\pm 0,3 \text{ m/s}$ .

## 5.3 Messfehlerbetrachtung

### 5.3.1 Nicht-quantifizierbare Fehlerquellen

Die folgenden zufälligen und systematischen Fehler können nicht quantifiziert werden und verbleiben als Hinweis in diesem Abschnitt bestehen. Zu den wichtigsten, nicht quantifizierbaren Fehlern am Versuchsfeld und im Labor gehören:

- Aufbauarten und deren Auswirkung auf die Schüttdichte/Belüftung (Abschnitt 5.1.2)
- Probenahme der Biomasse (Abschnitt 5.2.1)
- Abweichungen der Einstichhöhe Temp.- und Substratlanze durch Setzung
- Abweichungen der Temperatursensor-Position im BM durch Setzung
- Abweichungen der Elementaranalyse des Substrats durch Lagerung

### 5.3.2 Quantifizierbare Fehlerquellen

Bei den dargestellten Methoden zur Untersuchung der Biomeiler treten Fehler aufgrund zufälliger oder systematischer Ursachen auf. Die Fehler sind in den entsprechenden Abschnitten erklärt und werden in diesem Abschnitt überblicksartig in Tabelle 5.4 aufgelistet. Ihr Einfluss auf die Aussagekraft der Daten wird in Abschnitt 7 ausgewertet.

### 5.3.3 Auswertung der Fehler der manuellen Messungen

Für die Daten der manuellen Gas- und Temperaturmessungen werden Fehlermatrizen  $\underline{\mathbf{F}}$  verwendet. Eine Fehlermatrize ist die Summe aus Messgerätefehlern  $\underline{\mathbf{X}}$ , Probevolumenfehler  $\underline{\mathbf{Y}}$  und zufälligen Fehlern abhängig von der Einstichtiefe  $s$   $\underline{\mathbf{Z}}$  (Gl. 5.1). Die Fehlermatrizen werden für das positive Intervall  $\underline{\mathbf{F}}^+$  und das negative Intervall  $\underline{\mathbf{F}}^-$  berechnet und für die Auswertung verwendet.

$$\underline{\mathbf{F}} = \underline{\mathbf{X}} + \underline{\mathbf{Y}} + \underline{\mathbf{Z}} \quad (5.1)$$

Tabelle 5.4: Quantifizierbare Fehler

Fehlerart	Absoluter Messfehler	Bemerkung/Erklärung
<b>Aufbau</b>		
Wasserzusatz Biomeiler	im Mittel $\pm 0,46 \text{ m}^3$	siehe Tabelle B.5
Geometriemessung Biomeiler	$\pm 0,03 \text{ m}$	siehe Tabelle C.3
Substratmenge Gesamtversuch	$\pm 72 \text{ m}^3$	Rechnung, Abschnitt C.3
<b>Charakterisierung des Substrats</b>		
Waage Schüttdichte	$\pm 0,001 \text{ g}$	
Waage TS	$\pm 0,01 \text{ g}$	siehe Abschnitt 5.2.1
Waage oTS	$\pm 0,0001 \text{ g}$	siehe Abschnitt 5.2.1
Waage Siebturm	$\pm 0,01 \text{ g}$	siehe Abschnitt 5.2.1
<b>Temperatursensoren</b>		
Messgenauigkeit Temperatursensoren Biomasse	$\pm 0,5 \text{ K}$	siehe Abschnitt 5.2.2.1
Position Messfühler	$\pm 0,05 \text{ m} \rightsquigarrow \pm 0,5 \text{ K}$	siehe Abschnitt 5.2.2.1
Daten der Temperatursensoren insgesamt	$\pm 1 \text{ K}$	
Messgenauigkeit Temperatursensoren Zu- und Ablauf	$\pm 0,1 \text{ K}$	siehe Abschnitt 5.2.2.1, 5.2.3
<b>Temperaturlanze</b>		
Messgenauigkeit Temperaturlanze	$\pm 1 \text{ K}$	siehe Abschnitt 5.2.2.1
Einstechtiefe $s$	$\pm 0,015 \text{ m}$	siehe Abschnitt 5.2.2.1
<b>Messung der Gaskonzentration</b>		
Messgenauigkeit Gasmonitor $CH_4$ :	0-5 % $\rightsquigarrow \pm 0,5 \%$ 5-15 % $\rightsquigarrow \pm 1,0 \%$ >15 % $\rightsquigarrow \pm 3,0 \%$	
Messgenauigkeit Gasmonitor $CO_2$ :	0-5 % $\rightsquigarrow \pm 0,5 \%$ 5-15 % $\rightsquigarrow \pm 1,0 \%$ >15 % $\rightsquigarrow \pm 3,0 \%$	
Messgenauigkeit Gasmonitor $O_2$	$\pm 1,0 \%$	
Einstechtiefe $s$	$\pm 0,010 \text{ m}$	siehe Abschnitt 5.2.4
<b>Volumenstrommessung</b>		
Messgenauigkeit Volumenstrom	$\pm 0,02 \text{ L/Impuls}$	siehe Abschnitt 5.2.3
<b>Wetterdaten</b>		
Umgebungstemperatur	$\pm 0,05 \text{ K}$	
Niederschlagsmenge	$\pm 0,1 \text{ mm/h}$	
Windrichtung	$\pm 15^\circ$	
Windgeschwindigkeit	$\pm 0,3 \text{ m/s}$	
<b>Oberflächentemperatur</b>		
Emissionsgrad $\varepsilon$	$\pm 0,05 \rightsquigarrow \pm 1,0 \text{ K}$	siehe Abschnitt 5.2.2.3



Die Messgenauigkeit der Messgeräte  $\underline{\mathbf{X}}$  ist teilweise abhängig von der Messwerthöhe (Tab. 5.4). Die Probenvolumenfehler  $\underline{\mathbf{Y}}$  sind durch Messroutine entdeckte Fehler. Sie treten auf, wenn nicht genügen Probenvolumen am MP gezogen werden kann. Dies ist der Fall in den Schichten  $h_m$  und  $h_u$  bei der Einstechtiefe  $s \geq 1$  m. Wenn bei diesen MP  $O_2$  nachweisbar ist, ist zu wenig Porenvolumen für die Messung vorhanden oder eine Leck in der Messapparatur. Die Fehlerhöhe ist dann abhängig von der Gaskonzentration des Fehlergases  $G(O_2)$  (siehe Tab. 5.5).

Die zufälligen Fehler  $\underline{\mathbf{Z}}$  ergeben sich ebenfalls aus empirischen Werten. Die größten Fehler treten dabei an den Milieu-Übergangsbereichen auf, da sich hier Fehler der Lanzenposition besonders stark auswirken. D.h. für  $\vartheta$ ,  $CO_2$  und  $O_2$  der Bereich  $s < 1$  m Einstechtiefe und besonders die obere Schicht  $h_o$  aufgrund der Belüftung. Für  $CH_4$  besteht die größte Messungenauigkeit im Bereich der Methanoxidation. Die verwendeten Fehlerwerte sind in Tabelle 5.6 aufgetragen. Es wird angenommen, dass trotz der Setzung des Systems und Austrocknung der Randzone die Fehlerwerte im Verhältnis zur Reaktorgeometrie gleich bleiben.

## 5.4 Auswertungsverfahren

### 5.4.1 Auswahl der Biomeiler

Für eine Vergleichbarkeit fokussiert sich die Auswertung der manuellen Messungen auf die Daten der BM 2A - 2D. Diese Biomeiler weisen den gleichen Durchmesser auf und werden kurz nacheinander aufgebaut. Somit ist hier die höchste Vergleichbarkeit zu erwarten. BM 2C fungiert als Referenz und läuft ohne Wärmeentzug. BM 2A läuft nach ca. 50 Versuchstagen ohne Wärmeentzug.

### 5.4.2 Darstellung des vertikalen Profils

Die Darstellung des vertikalen Profils der Temperatur und der Gaskonzentrationen erfolgt mit dem Statistikprogramm R. R nutzt als Darstellungsgrundlage Matrizen und interpoliert linear zwischen den Messpunkten. Hierfür werden die Daten von 15 bis 22 Messpunkten zunächst einer Plausibilitätsüberprüfung unterworfen und vorhandene Datenlücken linear interpoliert. Zusätzlich dazu werden die Bedingungen der Reaktorgrenze wie folgt definiert:

$$G(CH_4) = 0 \%; G(CO_2) = 0 \%; G(O_2) = 21 \%; \vartheta = \vartheta_U(t) \quad (5.2)$$

### 5.4.3 Berechnung der Wärmeleistung

Nach einer Plausibilitätsüberprüfung werden die Daten mit dem Programm R statistisch verarbeitet. Zum Abgleich der Messzeitpunkte wird die Funktion „align“ genutzt, welche Zeitintervalle definiert. Für die Auswertung der Temperatur- und Durchflussmessungen werden die Daten auf ein Zeitintervall von 120 s gebracht.

Tabelle 5.5: Messwertabhängige Fehlerabschätzung für Probenvolumen für  $h_m$  und  $h_u$  bei Einstechtiefe  $s \geq 1$  m, Grundlage für **Y**

Fehlervolumen $G(O_2)$ [%]	abgeschätzter zusätzlicher Fehler der Gaskonzentration
$0 < G(O_2) \leq 1$ %	$G(CH_4) \rightsquigarrow +1,5$ % $G(CO_2) \rightsquigarrow +1,5$ % $G(O_2) \rightsquigarrow -G(O_2)$ %
$G(O_2) > 1$ %	$G(CH_4) \rightsquigarrow +2 * G(O_2)$ % $G(CO_2) \rightsquigarrow +2 * G(O_2)$ % $G(O_2) \rightsquigarrow -G(O_2)$ %

Tabelle 5.6: Fehlerabschätzung in Abhängigkeit von der Einstechtiefe  $s$ , Grundlage für **Z**

Höhe MP	Einstechtiefe $s$ [m]	$\vartheta$ [°C]	$G(CH_4)$ [%]	$G(CO_2)$ [%]	$G(O_2)$ [%]
$h_o(t)$	0,2	$\pm 1$	0	$\pm 2$	$\pm 2$
	0,5	0	0	$\pm 1$	$\pm 1$
	1,0	0	$\pm 0,5$	$\pm 1$	$\pm 1$
	1,5	$\pm 0,5$	$\pm 1$	0	0
	2,0	-	0	0	0
$h_m(t)$	0,2	$\pm 0,5$	0	$\pm 1$	$\pm 1$
	0,5	0	$\pm 1$	$\pm 0,5$	$\pm 0,5$
	1,0	0	$\pm 1,5$	0	0
	1,5	0	0	0	0
	2,0	-	0	0	0
$h_u(t)$	0,2	$\pm 0,5$	0	$\pm 1$	$\pm 1$
	0,5	0	$\pm 0,5$	0	0
	1,0	0	0	0	0
	1,5	0	0	0	0
	2,0	-	0	0	0

# 6 Auswertung

## 6.1 Auswertung der Wetterdaten

Der Temperatur- und Niederschlagverlauf sind in Abbildung 6.11 dargestellt. Die Berechnung der Wetterdaten befindet sich in Abschnitt B.1 und eine Übersicht ist in Tabelle B.1 aufgetragen. Zur Bewertung wird die Wetterlage in zwei prozessrelevante Kategorien eingeteilt:

1. Kategorie I: „Warm und trocken“ - Stundendaten  $\vartheta_U \geq 12,5 \text{ }^\circ\text{C}$  und kein Niederschlag
2. Kategorie II: „Kalt und nass“ - Stundendaten  $\vartheta_U < 12,5 \text{ }^\circ\text{C}$  und Niederschlag  $> 0,5 \text{ mm}$

**Ergebnisse** Die Umgebungstemperaturen  $\vartheta_U$  sind 76,5 % der Versuchszeitstunden  $\geq 12,5 \text{ }^\circ\text{C}$ . Ab dem 15. Versuchstag treten Umgebungstemperaturen von  $< 15 \text{ }^\circ\text{C}$  fast ausschließlich nachts auf. In 93 % der Versuchsstunden besteht kein Niederschlag und 6 % der Niederschläge befinden sich im Sprühregen-Bereich. Die am Versuchsfeld gemessene Windgeschwindigkeit beträgt nach Beaufort-Skala zu 83 % Rang 0 (Windstille). Der Wind weht zu 38 % aus Nord-Osten und zu 34 % aus Süden.

Tabelle 6.1: Wetterlage im Versuchszeitraum

Wetterelement	Anteil an der Gesamtzeit
Umgebungstemperatur $> 12,5 \text{ }^\circ\text{C}$	77 %
kein Niederschlag	93 %
Windstärke 0	83 %
Windrichtung Nord-Ost und Süd	72 %

**Schlussfolgerungen** Die Wetterdaten bestätigen den visuellen Eindruck von der geschützten Lage (Windgeschwindigkeit). Die Wetterlage entspricht 75 % der Zeit Kategorie I und ist selbst bei niedrigeren Temperaturen trocken. Durch die homogenen Wetterverhältnisse ist die Vergleichbarkeit der Messwerte bezüglich der Gas- und Temperaturverläufe gegeben. Somit wird der Einfluss von Kleinwetterlagen, wie z.B. Tag- und Nachttemperaturen, untersucht.

## 6.2 Charakterisierung des Substrats

Im folgenden werden die Ergebnisse der Substratcharakterisierung dargestellt. Eine Übersicht befindet sich in Tabelle 6.2.

Tabelle 6.2: Parameter des Substrats

Parameter	Wert
Schüttdichte, lose Schüttung $\varrho_S$	$(342,3 \pm 8,4) \text{ kg/m}^3$
Mittlere Schüttdichte $\varrho_{SK}$	$(496,7 \pm 17,4) \text{ kg/m}^3$
Komprimierung $K_2$	$(145,1 \pm 8,6) \%$
Wassergehalt $W$	$(43,8 \text{ bis } 48,1 \pm 1,5) \%$
Wärmekapazität $c_m$	$2,51 - 2,64 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ (nach Gl. 4.2)
Wärmeleitfähigkeit $\lambda$	$0,20 - 0,30 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ (nach Gl. 4.3)
C:N-Verhältnis	25:1
Heizwert $H_S$	$8,3 \text{ MJ/kg}_{TS}$
Korngröße	60 % ist $< 3,15 \text{ mm}$
$oTS_S$	$25,3 \%$ $oTS$ , wobei $17 \%$ $oTS < 3,15 \text{ mm}$

### 6.2.1 Schüttdichte

Die Daten der Schüttdichtemessung  $\varrho_S$  sind in Tabelle B.2 aufgetragen. Für die Berechnung siehe Abschnitt B.2. Das arithmetische Mittel ergibt sich zu  $\varrho_S = (342,3 \pm 8,4) \text{ kg/m}^3$ .

Die Schüttdichte der bei 60 kg komprimierten Schüttung  $\varrho_{SK}$  berechnet sich aus den Daten in Tabelle B.3 zu  $\varrho_{SK} = (496,7 \pm 17,4) \text{ kg/m}^3$ .

Dies entspricht einer Komprimierung  $K_1$  bei 60 kg auf  $(145,1 \pm 8,6) \%$  bei Fehlerfortpflanzung mittels Taylorpolynom (siehe Abschnitt C.2). Wird die Komprimierung durch das Volumenverhältnis von geliefertem Substrat zu Biomeilervolumen errechnet, ergibt sich  $K_2 = (143 \pm 10) \%$  (siehe Abschnitt C.3) und bestätigt somit die Messung von  $\varrho_{SK}$ . Entsprechend wird mit einer mittleren Schüttdichte von  $(496,7 \pm 17,4) \text{ kg/m}^3$  gerechnet.

### 6.2.2 Wassergehalt, Wärmekapazität und -leitfähigkeit

Der Wassergehalt des gelieferten Substrats  $W_S$  wird durch das Labor bestimmt und beträgt  $W_S = (37,7 \pm 1) \%$ , siehe Abschnitt B.3.

Zur Berechnung des Wassergehalts der einzelnen Biomeiler  $W_{BM_i}$  nach der Wässerung wird der dokumentierte Wasserzusatz  $V_{ZH_2O_{BM_i}}$  aus Tab. B.5 auf das jeweilige Volumen des Biomeilers  $V_{BM_i}$  und die Schüttdichte  $\varrho_{SK}$  bezogen (Gleichung 6.1).

$$W_{BM_i} = 1 - \frac{V_{BM_i} * \varrho_{SK} * TS_S}{V_{BM_i} * \varrho_{SK} + V_{ZH_2O_{BM_i}} * \varrho_{H_2O}} \quad (6.1)$$

**Ergebnisse** Der Wassergehalt der Biomeiler ist in Tabelle B.6 dargestellt. Er liegt zwischen 43,8 und 48,1 % mit einem durchschnittlichem Fehler von  $\pm 1,5 \%$ .

Die Wärmekapazität  $c_m$  berechnet sich nach Gl. 4.2 zu  $2,51 - 2,64 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ .

Die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  ist ebenfalls abhängig von dem Wassergehalt  $W$  und der Temperatur  $\vartheta$  [52]. In Versuchen mit kompostiertem, sterilisiertem Material ergibt sich die Wärmeleitfähigkeit bei  $W = 48 \%$  und  $40 - 60 \text{ }^\circ\text{C}$  zu  $0,20 - 0,30 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ .

**Schlussfolgerungen** Der Wassergehalt der Biomeiler befindet sich im günstigen Bereich (siehe Abschnitt 3.3.2). Es wird angenommen, dass sich in diesem Fall ein Unterschied von  $W < 5\%$  nicht signifikant auf die Wärmeentwicklung auswirkt. Entsprechend sind die Biomeiler hinsichtlich des Wassergehalts als vergleichbar anzusehen.

Die Wärmeleitfähigkeit ist als mäßig wärmeleitend einzustufen und ein Wärmeentzug ist vor allem aus dem Substrat in geringem Abstand zum WÜ zu erwarten.

### 6.2.3 C:N-Verhältnis und Heizwert

Die Ergebnisse der Elementaranalyse des Substrats sind in Tabelle 6.3 dargestellt. Das Substrat besitzt ein C:N-Verhältnis von 25:1 und liegt damit im empfohlenen Bereich (siehe Abschnitt 3.3.1). Entsprechend ist ein Temperaturverlauf ohne Stickstofflimitation vgl. Abbildung 3.2 zu erwarten.

Tabelle 6.3: Ergebnisse der Elementaranalyse

Element	Anteil [%]
Kohlenstoff	23,5
Schwefel	0,2060
Stickstoff	0,95
Wasserstoff	2,61

Der Heizwert  $H_S$  wird vom Labor mit  $8,3 \text{ MJ/kg}_{TS}$  bestimmt. Damit liegt das Substrat unter den in Deutschland vorkommenden biogenen Festbrennstoffen (vgl. Abschnitt 4.1.3.4). Dies bestätigt die Annahme, dass sich das Substrat bereits im fortgeschrittenen Abbauprozess befindet.

### 6.2.4 Korngröße und $oTS$

**Ergebnisse** Die Korngrößenverteilung ist in Abbildung 6.1a dargestellt. Die Daten sind in Tabelle B.7 gesammelt und in Tabelle B.8 ausgewertet. Die Daten der  $oTS_S$ -Messung werden in Tabelle B.9 ausgewertet. Es ist auffällig, dass 60 % Gewichtsanteil des Substrats aus dem Feinkornanteil  $< 3,15 \text{ mm}$  besteht. Die Gewichtsanteile der Mittel- und Grobanteile liegen zwischen 7 und 18 %. Der  $oTS_S$  zeigt eine reziproke Proportionalität zur Korngröße. D.h. dass der Feinkornanteil verhältnismäßig wenig organisch abbaubare Verbindungen enthält, während der  $oTS_S$  des Grobkornanteils frischer Biomasse entspricht (Glühverlust  $60\text{--}70\%_{GV}$ ).

**Schlussfolgerungen** Die Korrelation der Abbildungen 6.1 zeigt, dass sich das Substrat bereits im fortgeschrittenen Zersetzungsprozess befindet. Die leicht verfügbaren Substanzen sind bereits zersetzt und das grobe Strukturmaterial verbleibt in der Biomasse für komplexere, langsamere Abbauprozesse. Damit kann die visuelle Einschätzung aus den Abbildungen 5.5 und B.1 bestätigt werden.

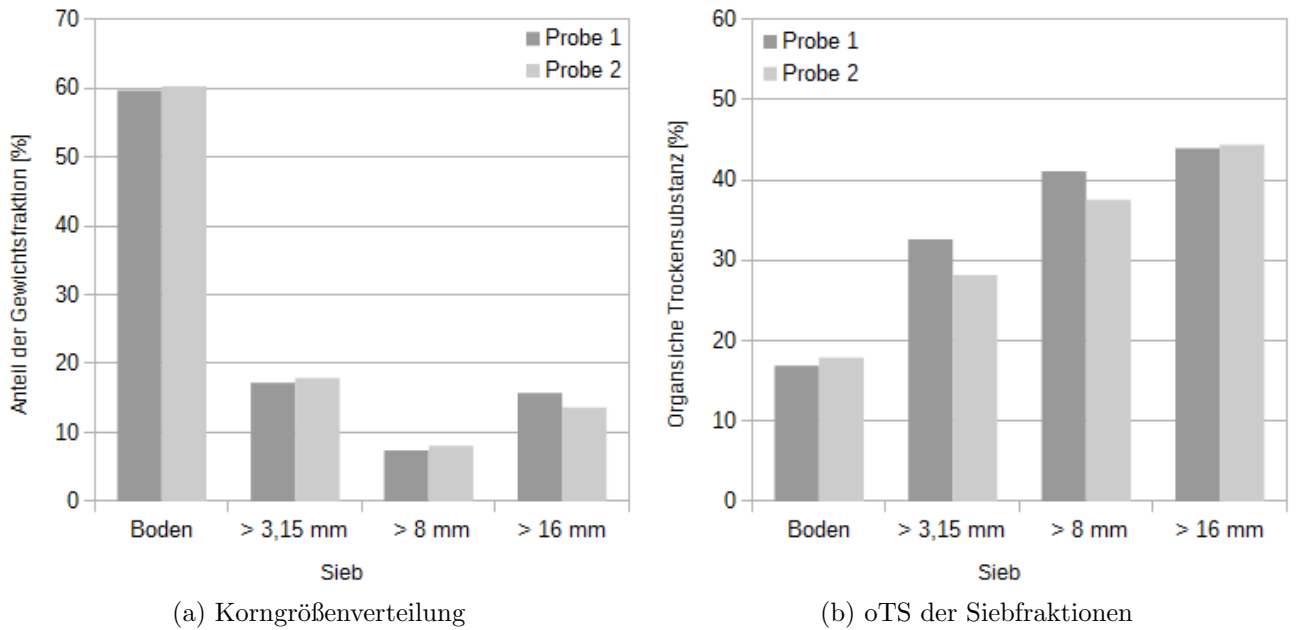


Abbildung 6.1: Korngrößenanalyse des Substrats: Verteilung und oTS

### 6.2.5 Volumenschwund durch Setzung

**Ergebnisse** Nach dem Versuchszeitraum werden die Biomeiler in ihrer Höhe vermessen. Die Ergebnisse sind in Tabelle B.12 aufgetragen. Im Versuchszeitraum besitzen die Biomeiler durchschnittlich  $(22 \pm 3)$  % Volumenschwund. In Abb. B.2 sind die Biomeiler zum Vergleich vor und nach dem Versuchszeitraum abgebildet.

**Schlussfolgerungen** Üblicherweise wird mit ca. 30 % Massenschwund gerechnet. Vom Volumenschwund kann nicht auf Massenschwund geschlussfolgert werden. Vom Erbauer der Anlage wird ein Volumenschwund von ca. 50 % nach 18 Monaten erwartet. Dies kann durch die Feldversuche nicht bestätigt werden.

## 6.3 Untersuchung des horizontalen Profils

Aufgrund der Form der Biomeiler kann eine rotationssymmetrische Verteilung der Messwerte im zylindrischen Reaktorraum vermutet werden. Für den Nachweis werden die Gaskonzentration  $G$  und die Temperatur  $\vartheta$  der Biomeiler Gr. 2 in drei Höhen der Messstellen  $MS(WEST)$  und  $MS(OST)$  manuell vermessen. Aufgrund der Lage der Biomeiler sind hier theoretisch die größten Unterschiede zu erwarten (siehe Abb. 5.1).

Zur rechnerischen Überprüfung wird ein Signifikanztest mit folgenden Annahmen durchgeführt:

- Nullhypothese: Die Abweichungen der Datensätze sind größer als ihr Fehler
- Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha$ : 80 %
- Parameter des Datensatzes:  $\vartheta$ ,  $G(CH_4)$ ,  $G(CO_2)$ ,  $G(O_2)$

Zur Berechnung der Hypothesenmatrix  $\underline{\mathbf{H}}$  wird der Betrag der Differenz der Datensätze  $\underline{\mathbf{D}}$  von der Summe der Fehlermatrizen subtrahiert (Gl. 6.2). Da der positive und negative Fehlerintervall sich teilweise unterscheiden, werden die Fehlermatrizen in Abhängigkeit vom jeweiligen Vorzeichen von  $\underline{\mathbf{D}}$  verwendet. Liegt dann der prozentuale Anteil der Werte von  $\underline{\mathbf{H}} \geq 0$  über der Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha$ , kann die Nullhypothese verworfen werden. Exemplarisch ist dies hier für BM 2A dargestellt.

$$\underline{\mathbf{H}} = \begin{cases} (\underline{\mathbf{F}}_{West}^- + \underline{\mathbf{F}}_{Ost}^+) - |\underline{\mathbf{D}}|, & \text{für } \underline{\mathbf{D}} \geq 0 \\ (\underline{\mathbf{F}}_{West}^+ + \underline{\mathbf{F}}_{Ost}^-) - |\underline{\mathbf{D}}|, & \text{für } \underline{\mathbf{D}} < 0 \end{cases} \quad \text{wobei } \underline{\mathbf{D}} = \underline{\mathbf{M}}_{West} - \underline{\mathbf{M}}_{Ost} \text{ und } \underline{\mathbf{F}} = \underline{\mathbf{X}} + \underline{\mathbf{Y}} + \underline{\mathbf{Z}} \quad (6.2)$$

$$\begin{bmatrix} -3 & 0 & 5,7 & 6 \\ 2 & 0,9 & 3,5 & 2,1 \\ 0 & -0,6 & 2,1 & 1,6 \\ 0 & -3 & -0,8 & 0 \\ 1 & 0 & 1,4 & 1,8 \\ 2 & 1,1 & 5,2 & -0,8 \\ 0 & 0,4 & 0,4 & 1 \\ 1 & 4,7 & 5,5 & 1 \\ 3 & 0,8 & 0,7 & -0,1 \\ 2 & 1,2 & 5,5 & 0 \\ 1 & 3,6 & 3,1 & 1 \\ 1 & 5,3 & 4 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4 & 0 & 6 & 6 \\ 2 & 1 & 6 & 4 \\ 2 & 2,5 & 8 & 3 \\ 3 & 3,5 & 6 & 0 \\ 3 & 0 & 4 & 4 \\ 2 & 3 & 7 & 2 \\ 2 & 7 & 6 & 1 \\ 2 & 6 & 6 & 1,2 \\ 3 & 1 & 6 & 4 \\ 2 & 2 & 6 & 0 \\ 2 & 6 & 6 & 1 \\ 2 & 6 & 6 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -7 & 0 & 0,3 & 0 \\ 0 & 0,1 & 2,5 & -1,9 \\ 2 & 3,1 & 5,9 & -1,4 \\ -3 & 6,5 & 6,8 & 0 \\ -2 & 0 & -2,6 & 2,2 \\ 0 & -1,9 & 1,8 & -2,8 \\ 2 & -6,6 & -5,6 & 0 \\ 1 & -1,3 & -0,5 & -0,2 \\ 0 & -0,2 & -5,3 & 4,1 \\ 0 & -0,8 & -0,5 & 0 \\ 1 & -2,4 & -2,9 & 0 \\ 1 & -0,7 & -2 & 0 \end{bmatrix}$$

**Ergebnisse** Die Messwerte von BM 2A sind in Abbildung 6.2 dargestellt, BM 2B-D in Abb. A.2, B.2a und B.2b. Auffällig sind die sehr guten Übereinstimmungen der Datensätze von  $MS(WEST)$  und  $MS(OST)$ . BM 2A zeigt die größten Abweichungen im Einstichbereich  $> 1$  m in der obersten Schicht  $h_o$  bei  $G(CO_2)$ . BM 2B besitzt in der untersten Schicht  $h_u$  bis zur Tiefe  $s$  von 1 m eine deutlich höheren Gaskonzentration von  $CH_4$  und  $CO_2$ . Die Irrtumswahrscheinlichkeiten der BM Gr. 2 sind in Tabelle 6.4 dargestellt und betragen bei allen BM Gr. 2  $> 80$  %. Somit kann die Nullhypothese verworfen werden.

Der Signifikanztest für BM Gr. 2 für die Rotationssymmetrie der Temperaturmessung mittels Temperatursensoren ist in Abschnitt B.8 dargestellt und kommt zu dem gleichen Ergebnis.

**Schlussfolgerungen** Die Messwerte der BM Gr. 2 sind zum Messzeitpunkt rotationssymmetrisch verteilt. Dies kann vor allem durch die sehr geschützte Lage des Versuchsfelds erklärt werden (Schattenwurf, Windschutz). Weiterhin begünstigen die geringen Rücklauftemperaturen  $\vartheta_r$  eine homogene Temperaturverteilung in den BM. Es ist auch anzunehmen, dass im Verlauf der Versuche ( $> 4$  Monate) besonders in der Randzone die Unterschiede zwischen den MS zunehmen. Die Messwertinterpretation erfolgt folgend im Zusammenhang mit dem vertikalen Profil.

Tabelle 6.4: Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha$  beim Seitenvergleich BM Gr. 2, manuelle Messung

BM	2A	2B	2C	2D
$\alpha$ [%]	87,5	81,3	81,3	83,3

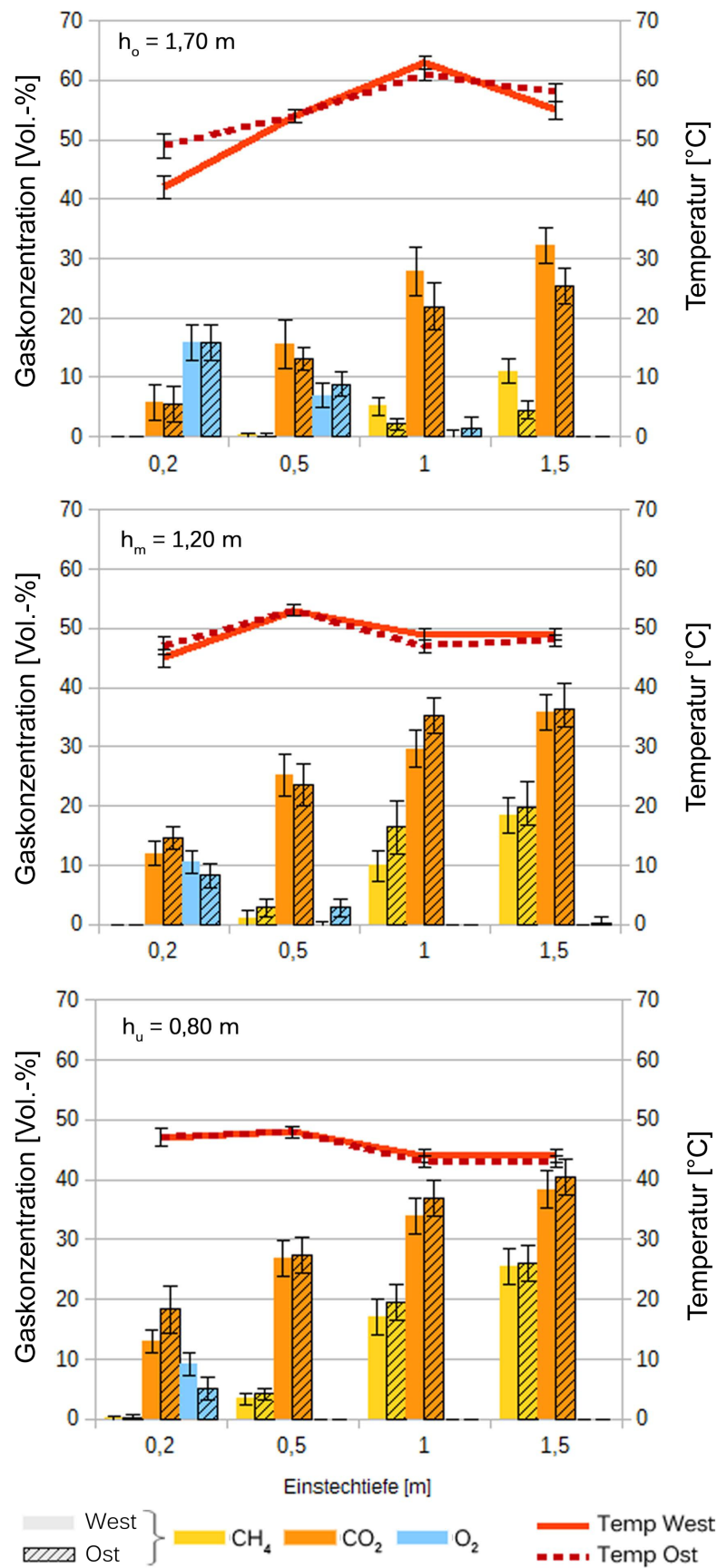


Abbildung 6.2: Temperatur und Gaskonzentrationen im Seitenvergleich, BM 2A



## 6.4 Untersuchung des vertikalen Profils

### 6.4.1 Annahmen und Begriffsbestimmung

Bei der Untersuchung einer Messstelle  $MS$  der Biomeiler wird festgestellt, dass sich ein vertikales Profil für die Schüttdichte  $\varrho$ , die Temperatur  $\vartheta$  und die Gaskonzentrationen  $G$  herausbildet. Dabei wird angenommen, dass die Substratparameter Wassergehalt  $W$ , C:N-Verhältnis und Korngröße beim Aufbau für das gesamte Substrat homogen verteilt sind und das Profil allein durch die Betriebsart und -weise entsteht.

Bei der Beschreibung werden die **Reaktorgrenze** (Biomeileroberfläche ohne Boden) und drei innere Zonen voneinander unterschieden: **Randzone** ( $s \leq 0,5$  m), **Mittelzone** ( $0,5$  m  $< s \leq 1,5$  m) und **Kernzone** ( $s > 1,5$  m) vgl. Abb. 5.4b.

### 6.4.2 Profil der Schüttdichte und des Abbaugrads

#### 6.4.2.1 Schüttdichte

**Ergebnisse** Die Ergebnisse der Messung der Schüttdichte sind in Abbildung A.5 dargestellt. Die höchste Schüttdichte wird in der Höhe 1,0 und 1,4 m erreicht und fällt im Verlauf zur oberen Schicht  $h_o$  sprunghaft ab. Bei 0,5 m streuen die Werte stark und tendieren ebenfalls dazu abzufallen.

**Schlussfolgerungen** Zu erwarten wäre ein kontinuierliches Absinken der Schüttdichte mit steigender Höhe. Durch den fortgeschrittenen Kompostierungsprozess wird die Schüttdichtemessung von folgenden Einflussfaktoren überlagert:

1. Der Wassergehalt ist in den Randzonen geringer als in der Mittelzone. Dies erklärt den sprunghaften Abfall der Schüttdichte von  $h = 1,4$  auf 1,6 m.
2. Im Kern wird weniger Material abgebaut, deswegen sinkt die Schüttdichte in Bodennähe ab (vgl. Abb. 6.7 und Abschnitt 6.4.2).
3. Die Schüttdichtemessung in der unteren Schicht ist erschwert, da dort v.a. grobes Material liegt. Dies führt zu Messungenauigkeiten.

#### 6.4.2.2 Abbaugrad

**Ergebnisse** Die Korngrößenverteilung der kompostierten Biomasse in Abhängigkeit von der Zone im Biomeiler (vgl. Abb. 5.8a) werden in Tabelle B.10 ausgewertet und sind in Abbildung 6.3a dargestellt. Die Daten der  $oTSP$ -Messung werden in Tabelle B.11 ausgewertet. Im Vergleich der Zonen ist der Feinkornanteil in der Randzone um 15 % höher als in der Mittel- und Kernzone. Bezüglich des  $oTSP$  der einzelnen Siebfraktionen unterscheiden sich die Zonen um maximal 5 %. Der  $oTSP$  der gesamten Biomasse ist in Tabelle 6.5 aufgetragen. Auffällig ist hier der geringe Wassergehalt in der Randzone und ein steigender  $oTSP$  mit steigendem Abstand zu der Reaktorgrenze. Der Heizwert  $H_P$  in der Kernzone ist im Vergleich zu  $H_S$  unverändert.

Tabelle 6.5: Zonenspezifische Charakterisierung der kompostierten Biomasse

Zone	$W_P$ [%]	$oTSP$ [% $_{oTS}$ ]	Abbaugrad $\eta$ [%]	$H_P$ [MJ/kg $_{TS}$ ]	C:N
Randzone (BM 4A)	42,0	15,0	41	5,5	21:1
Mittelzone (BM 4A)	48,2	18,0	29	6,3	24:1
Kernzone (BM 4B)	45,8	21,0	17	8,8	36:1

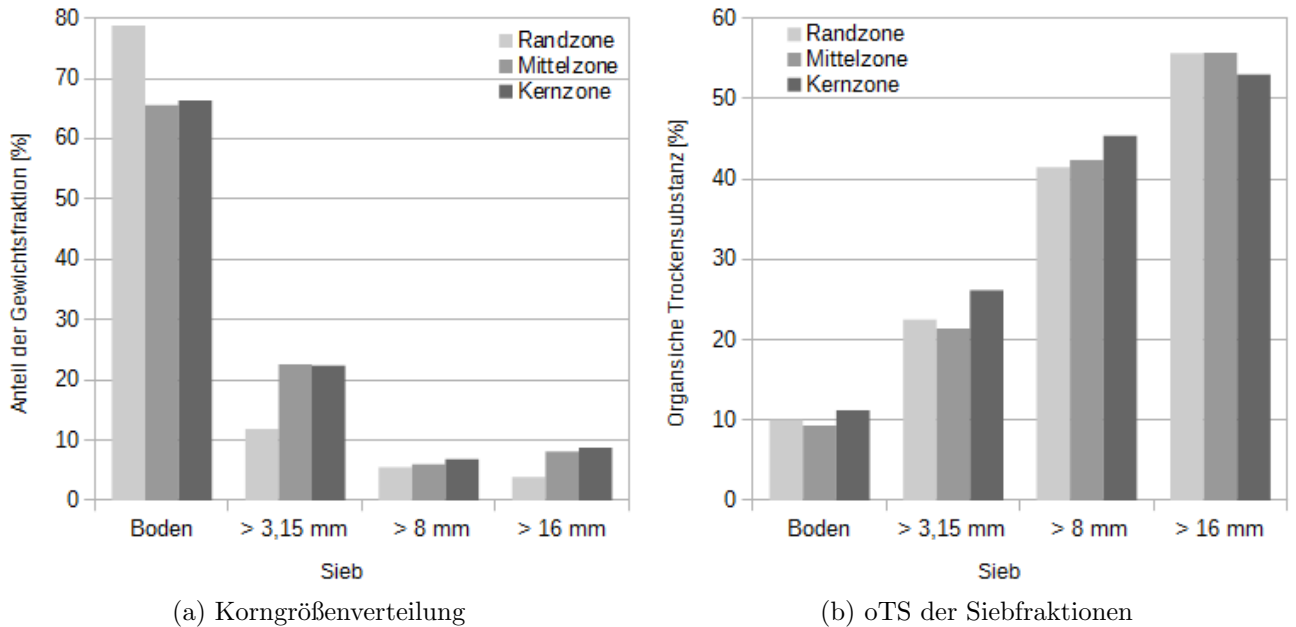


Abbildung 6.3: Korngrößenanalyse der kompostierten Biomasse: Verteilung und oTS

Das C:N-Verhältnis der kompostierten Biomasse steigt mit dem Abstand zur Reaktorgrenze. Wird der  $oTSP$  in Korrelation mit dem  $oTSS$  (Gleichung B.6) als Maßstab für den Abbaugrad genutzt, ergibt sich der geringste Abbaugrad in der Kernzone mit 17 %. Der höchste Abbaugrad in der Randzone wird mit 41 % berechnet (siehe Tab. 6.5 und B.11).

**Schlussfolgerungen** Mit fortschreitendem biochemischen Zersetzungsprozess ist eine Verringerung des Wassergehalts  $W_P$ , Heizwerts  $H_P$ , C:N-Verhältnisses und eine Erhöhung des Feinkornanteils zu erwarten. Dies konnte durch die Untersuchungen für die Randzone bestätigt werden. Der Abbaugrad  $\eta$  sinkt mit dem Abstand zur Reaktorgrenze. Dies bestätigt die Vermutung, dass die Biomasse im Festbettreaktor einen signifikant höheren Abbau in den Bereichen zeigt, die aufgrund der Nähe zur Reaktorgrenze durch die Belüftung mit Sauerstoff versorgt werden können. Dabei finden aerobe Abbauprozesse statt, die das Substrat wesentlich schneller und vollständiger zersetzen als anaerobe Prozesse, siehe dazu auch die visuelle Bildanalyse der Abbildungen 6.7. Da aerobe Prozesse mehr Wärmeenergie freisetzen als anaerobe Prozesse, wird davon ausgegangen, dass ebenfalls eine höhere Reaktionswärme  $\dot{Q}_R$  in der Randzone freigesetzt wird und sich dies in den Temperaturmessungen widerspiegelt. Die Messergebnisse des Heizwerts  $H_P$  stützen diese Annahme.



(a)  $h = 0,5 \text{ m}$

(b)  $h = 1,0 \text{ m}$



(c)  $h = 1,4 \text{ m}$

Abbildung 6.4: Unterschiede im Substratabbau in Abhängigkeit von der Schichthöhe, aufgenommen nach Abhebung des Silonetz im Biomeiler

### 6.4.3 Profil der Gaszusammensetzung

#### 6.4.3.1 Gaskonzentrationen im Festbettreaktor

Die Messwerte der Gaskonzentrationen  $G$  sind in den Abbildungen A.6, 6.5, 6.6, A.7 dargestellt.

**Ergebnisse** Sauerstoff  $O_2$  ist nur in der Randzone nachweisbar. In der Kernzone sind Gaskonzentrationen über 40 % Kohlenstoffdioxid bzw. 30 % Methan messbar. Weiterhin erscheint das Profil glockenförmig und ist entsprechend zur oberen Zylinderkante abgeschrägt. Die Unstetigkeiten ergeben sich wie in Abschnitt 5.2.4 erläutert. Besonders in den Profilen bis 64 Tagen Versuchszeit sind im  $MP(2,0; 2,0)$  hohe Konzentrationen an  $G(CH_4)$  und  $G(CO_2)$  messbar. D.h. die Randzone entwickelt sich im Zeitverlauf vertikal und horizontal unterschiedlich.

Weiterhin verändert sich die Konzentration der Gase eines MP im **Zeitverlauf**. Beispielsweise sind bei BM 2B und 2C nach 32 Tagen in der Randzone Gaskonzentrationen  $G(CH_4) < 25\%$  bzw.  $G(CO_2) < 35\%$  nachweisbar, während nach 115 Tagen nur noch  $G(CH_4) < 5\%$  und  $G(CO_2) < 25\%$  gemessen werden (Abb. 6.5 und 6.6). Zusätzlich dazu nehmen in der Kernzone die Gaskonzentrationen von  $CH_4$  und  $CO_2$  im Zeitverlauf ab.

Beim **Vergleich der Biomeiler** Gr. 2 fällt auf, dass es keine Unterschiede in der maximalen Gaskonzentration  $G(CH_4)$  und  $G(CO_2)$  im Versuchszeitraum gibt, die außerhalb der zu erwartenden Messungenauigkeiten liegen (vgl. Abschnitt 5.2.4). Auch bezüglich der Belüftung im Verhältnis zu den Mantelflächen bestehen im Profil der Gaszusammensetzung keine signifikanten Unterschiede zwischen den BM.

**Schlussfolgerungen** Die Profile bestätigen damit die Annahme, dass sich die BM trotz Einbauten (Sensorrohre, Silonetz, WÜ) ausschließlich über die Oberfläche des Festbettreaktors belüften, da dort Sauerstoff nachweisbar ist. Der Bereich der stärksten Belüftung ist somit die obere Außenkante des Zylinders. Die ausgeprägte Glockenform in der Versuchszeit bis 64 Tage spricht weiterhin für einen Kamineffekt, welcher Gas aus der Mittel- und Kernzone in die Deckschicht trägt. Die Unterschiede in der vertikalen und horizontalen zeitlichen Entwicklung der Randzone kann auch durch die Unterschiede in der Schüttdichte erklärt werden, denn Bereiche mit geringerer Schüttdichte besitzen mehr Porenvolumen für den konvektiven Gasaustausch. Die Profilveränderung im **Zeitverlauf** ist einerseits auf den fortschreitenden Kompostierungsprozess zurückzuführen, denn es sind weniger leicht verfügbare Nährstoffe für die biochemische Umsetzung vorhanden und die Freisetzung von  $CH_4$  und  $CO_2$  nimmt ab. Andererseits führt die Wasserdiffusion zur Reaktorgrenze zu einem Austrocknen der Randzone (vgl. Abschnitt 6.4.2). Das freiwerdende Porenvolumen dient dem Gasaustausch. Es ist zu erwarten, dass sich die Randzone im Zeitverlauf weiter radial nach innen ausdehnt bis sich die Gradientkraft der Diffusion und die Oberflächenspannung des Porenwassers im Gleichgewicht befinden.

Die BM Gr. 2 sind trotz unterschiedlichem Temperaturniveau und Wärmeentzug bezüglich ihrer Profile der Gaszusammensetzung gleich. D.h. dass der Wärmeentzug in der Größenordnung bis 2 kW keinen Einfluss auf die biochemischen Abbauprozesse der Festbettreaktoren ausübt.



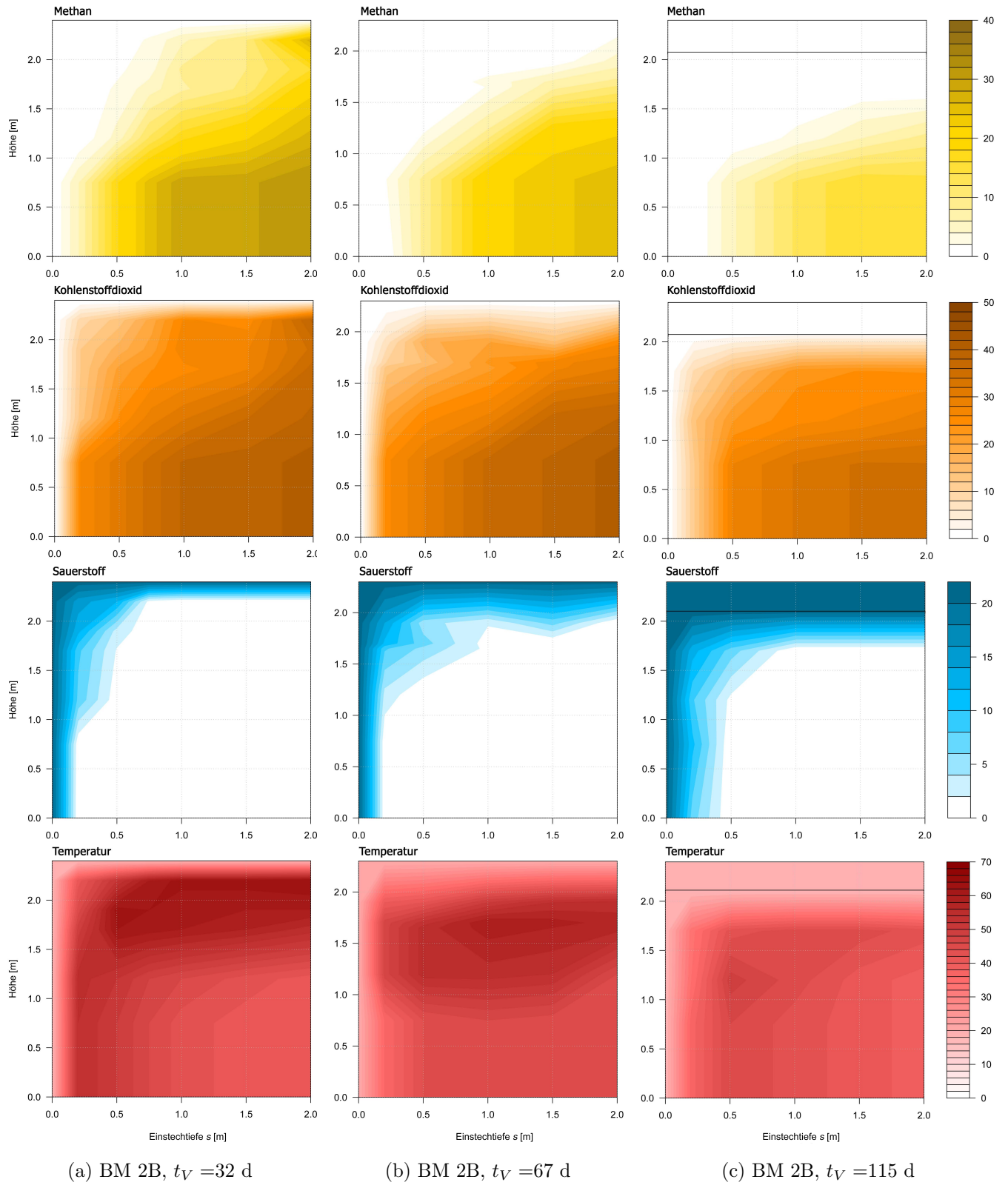


Abbildung 6.5: Profil der Gaskonzentrationen  $G$  [%] und der Temperatur  $\vartheta$  [°C] im Zeitverlauf, BM mit Wärmeentzug (BM 2B)

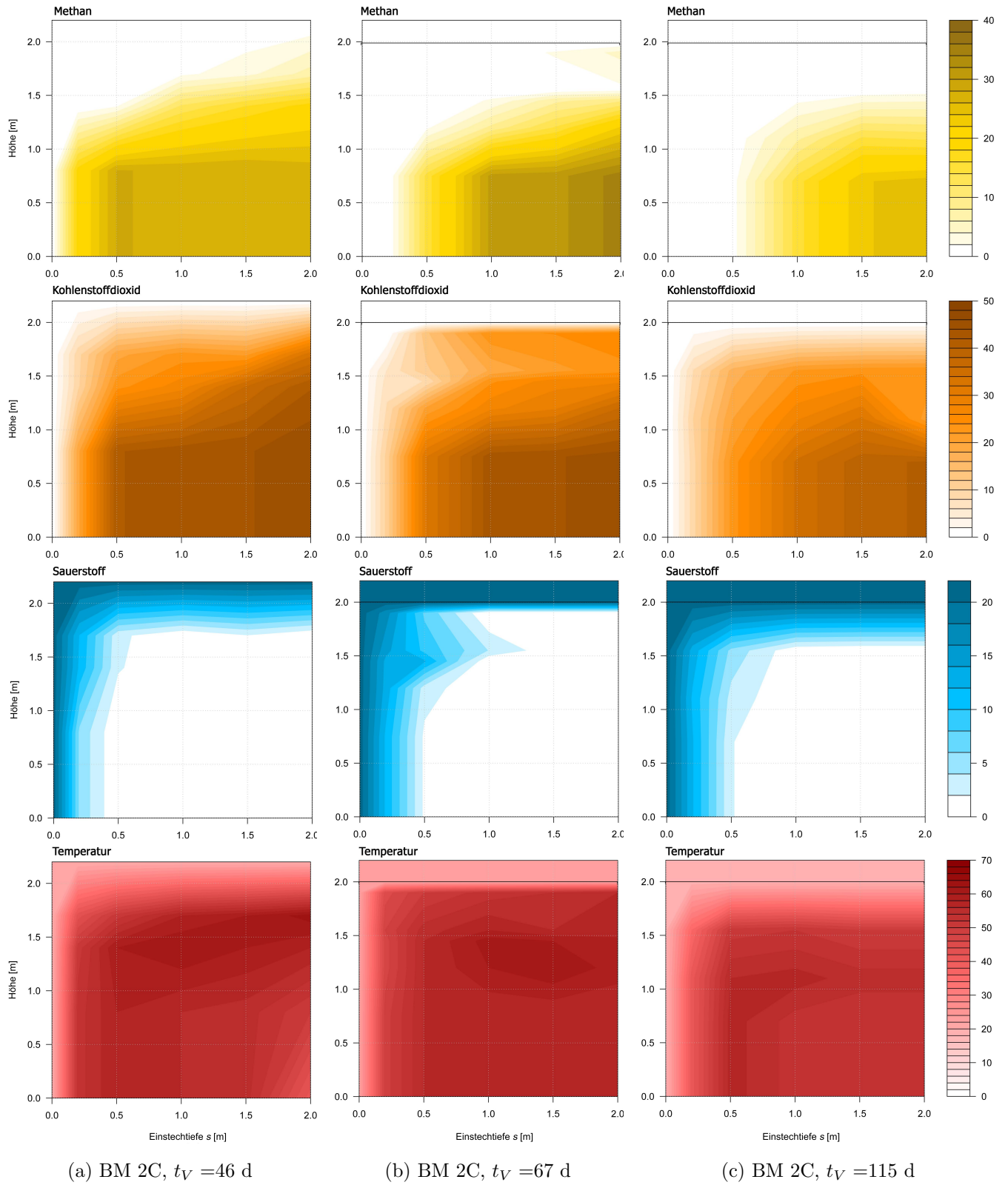


Abbildung 6.6: Profil der Gaskonzentrationen  $G$  [%] und der Temperatur  $\vartheta$  [°C] im Zeitverlauf, BM ohne Wärmeentzug (BM 2C)

### 6.4.3.2 Optischer Nachweis der Mikroorganismen

Ein weiterer Indikator für das vertikale Profil der Gaszusammensetzung im Biomeiler ist der Nachweis von Mikroorganismen. Beim Abbau der Biomeiler werden Fotografien von den horizontalen Schnittebenen erstellt, welche durch den Abbau mit Hilfe der Silonetze entstehen (Abb. A.12 und 6.8). Die Färbungen setzen sich beim Aufgraben entsprechender Stellen weiter im Substrat fort.

**Ergebnisse** Auffällig ist die weiße Zeichnung in schichtspezifischer Breite und in ca. 0,5 m Abstand zur Reaktorgrenze (Abb. 6.7a). In der unteren Schicht  $h_u = 0,6$  m beträgt die schichtspezifische Breite ca. 0,1 - 0,2 m während sie in der oberen Schicht  $h_o = 1,6$  m über ca. 1,0 m nachweisbar ist. Des Weiteren ist im Gesamtbild (Abb. 6.7b) auffällig, dass die weiße Zeichnung den hellbraunen Außenkreis von dem schwarz-braunen Innenkreis trennt.

**Schlussfolgerungen** Aufgrund der Erkenntnisse aus dem Substratabbau (Abschnitt 6.4.2) und den Messungen der Gaskonzentration deutet dies auf MO hin, welche fakultativ anaerob im Übergangsbereich vom aeroben zur anaeroben Bereich im BM leben (z.B. Actinomyceten). Da die Belüftung in der unteren Schicht  $h_u$  durch das geringere Porenvolumen (Schüttdichteerhöhung) geringer ist, dehnt sich der Übergangsbereich weniger aus als in der oberen Schicht  $h_o$ . Ebenfalls aus diesem Grund ist der Übergangsbereich parallel zur Deckschicht ausgeprägter als der Übergangsbereich parallel zur Mantelfläche. Dies korreliert mit den Beschreibungen der Rand-, Mittel- und Kernzone im Profil der Gaszusammensetzung.



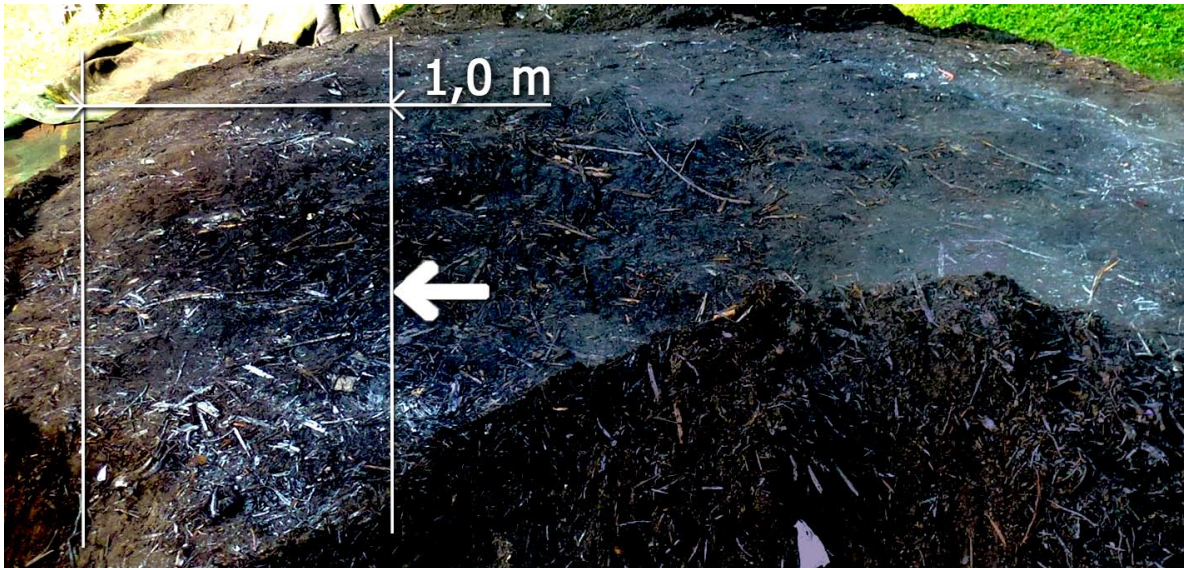
(a) Abstand zu Reaktorgrenze, BM 4B  $h = 1,4$  m



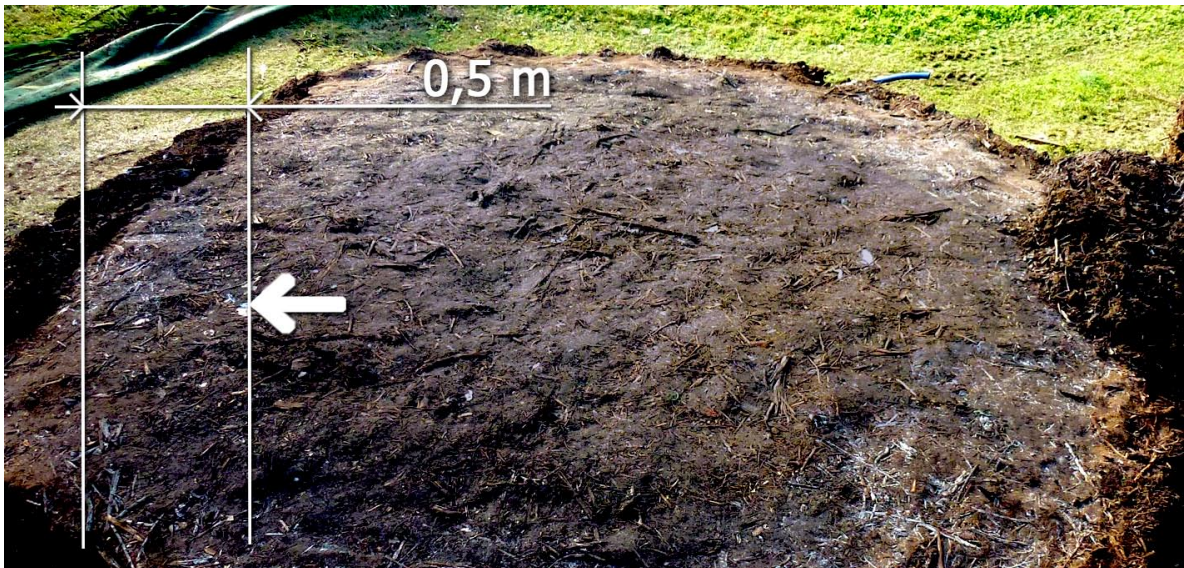
(b) Gesamtbild, BM 3B  $h = 1,6$  m

Abbildung 6.7: Weißer Ring als Indiz für den Übergangsbereich von aerob zu anaerob





(a)  $h = 1,6 \text{ m}$



(b)  $h = 1,1 \text{ m}$



(c)  $h = 0,6 \text{ m}$

Abbildung 6.8: Breite des schichtspezifischen Übergangsbereich (aerob-anaerob), BM 3B



## 6.4.4 Profil der Temperatur

### 6.4.4.1 Temperaturfeld im Festbettreaktor

Die Messwerte der Temperatur  $\vartheta$  sind in den Abbildungen A.6, 6.5, 6.6, A.7 dargestellt.

**Ergebnisse** Die Temperatur ist am höchsten im Übergangsbereich zwischen Rand- und Mittelzone und erreicht ca. 50 bis 60 °C. Dabei ist das Temperaturprofil parallel zur Deckschicht meist ausgeprägter. In der Kernzone befinden sich in BM Gr. 2 mit Wärmeentzug Temperaturen von 30 - 35 °C und in BM ohne Wärmeentzug Temperaturen von 35 - 40 °C.

Im **Zeitverlauf** zeigen sich starke Unterschiede zwischen Biomeilern mit und ohne Wärmeentzug. Biomeiler ohne Wärmeentzug (BM 2A und 2C) zeigen ein ausgeprägtes Temperaturprofil mit heißestem Bereich mit zeitabhängigem Abstand zur Reaktorgrenze. Im Zeitverlauf verändert sich der Abstand zur Reaktorgrenze von ca. 0,3 bis 1,0 m und nimmt in der Breite zu. Im Durchschnitt sind die Temperaturen um ca. 20 K höher als in BM ohne Wärmeentzug.

Biomeiler mit Wärmeentzug (BM 2B und 2D) besitzen nach 30 Tagen ein ausgeprägtes Profil vergleichbar mit den Biomeilern ohne Wärmeentzug. Im Zeitverlauf nimmt die Temperatur in den Schichten mit WÜ stärker ab als bei BM ohne Wärmeentzug. Die Bereiche mit der höchsten Temperatur befinden sich zwischen WÜ und Reaktorgrenze und sind zur Deckfläche der BM ausgeprägter. Nach 115 Tagen ist das Temperaturprofil nur noch schwach ausgeprägt und die Temperaturen im BM befinden sich zwischen 35 und 45 °C.

**Schlussfolgerungen** Wie zu erwarten, liegt der Bereich mit den höchsten Temperaturen im Abstand von 0,5 - 1 m zur Reaktorgrenze. Je größer der Abstand zur Reaktorgrenze, desto geringer die Reaktionswärme  $\dot{Q}_R$  aufgrund der Belüftung mit  $O_2$  (siehe Abschnitt 6.4.3). Je geringer der Abstand zur Reaktorgrenze, desto höher der Wärmeverlust durch Konvektion  $\dot{Q}_{konv}$  und desto geringer der Wassergehalt  $W$  (siehe Abschnitt 6.4.2). D.h. der Ort der höchsten Temperatur ist abhängig von der Reaktionswärme  $\dot{Q}_R$ , dem Wärmeverlust  $\dot{Q}_V$  und dem Wärmestrom durch Konvektion  $\dot{Q}_{konv}$  und der spezifischen, ortsabhängigen Wärmekapazität  $c_m$ . Zusätzlich dazu ist der Wärmeverlust  $\dot{Q}_V$  in der unteren Schicht  $h_u$  geringer als in der oberen Schicht  $h_o$  und abhängig vom Temperaturgradienten.

D.h. es kann nachgewiesen werden, dass die Temperatur ein **Summenparameter** aus sich überlagernden Effekten ist:

1. Reaktionswärme  $\dot{Q}_R$  durch MO in abh. von der Belüftung  $G(O_2)$ , dem Wassergehalt  $W$ , den verfügbaren Nährstoffen (C:N-Verhältnis, Versuchszeit) und der Temperatur  $\vartheta$
2. Wärmeverlust  $\dot{Q}_V$  abh. von der Schüttdichte und Witterung und Konvektion  $\dot{Q}_{konv}$
3. Wärmeentzug
4. Speicherwärme  $\dot{Q}_{Spei}$  abh. von  $c_m$  und  $W$

#### 6.4.4.2 Oberflächentemperatur

**Ergebnisse** In Tabelle A.1 sind die Messwerte der Oberflächentemperatur von BM Gr. 2 im Vergleich aufgetragen. Im Vergleich ergeben sich keine Abweichungen der Oberflächentemperaturen, die größer sind als der anzunehmende Messfehler. Ein Vergleich der Oberflächentemperatur im Tagesgang (morgens und abends - Tabelle A.3) zeigt eine Schwankung der Messwerte um ungefähr denselben Betrag wie die Umgebungstemperatur. Die Messwerte der Mantelfläche liegen im Versuchszeitraum zwischen 17 und 24 °C.

Im Zeitverlauf werden bis zum 35. Versuchstag Temperaturunterschiede  $\Delta\vartheta$  zwischen Oberflächentemperatur  $\vartheta_O$  (Gesamtbild, Durchschnittswert) und Umgebungstemperatur  $\vartheta_U$  von ca. 7 - 9 K gemessen. Ab dem 50 Versuchstag beträgt  $\Delta\vartheta$  ca. 2 - 4 K.

Die Gesamtbilder liegen in der Temperatur ca. 2 - 4 K niedriger als die Nahaufnahmen der Mantel- und Deckflächen des Biomeilers. Abbildung A.8 zeigt exemplarisch drei Aufnahmen eines Messzeitpunktes. Auffällig sind die unterschiedlichen Oberflächenstrukturen der Messflächen: Die Mantelfläche ist zerklüftet und die Deckfläche ist glatt. Das Zentrum der Deckfläche besitzt zum selben Messzeitpunkt eine ca. 3 K höhere Temperatur als die Mantelfläche.

**Schlussfolgerungen** Wie zu erwarten, schwankt die Oberflächentemperatur mit dem Tagesgang der Umgebungstemperatur. Aufgrund der Austrocknung der Randzone sinkt die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  im Zeitverlauf und die Randzone fungiert als Dämmschicht. Entsprechend nimmt der Temperaturunterschied zwischen Oberfläche der Biomeiler und Umgebungstemperatur im Zeitverlauf ab. Vermutlich ist bei Außentemperaturen  $< 5$  °C ein anderer Verlauf der Temperaturdifferenzen zu erwarten, aufgrund der veränderten Austrocknung der Randzone (temperaturabhängige Wasserdampfsättigung von Luft). Dies kann allerdings durch diesen Versuch nicht nachgewiesen werden.

Die Oberflächenstruktur der Mantelfläche lässt aufgrund der vergrößerten Oberfläche einen höheren Wärmeverlust durch Konvektion im Vergleich zur Deckfläche vermutet. Dies ist bei Windstärken der Beaufort-Skala  $> 1$  zu erwarten. Weiterhin ist die Oberflächentemperatur der Deckfläche im Zentrum höher als am Rand. Diese Verteilung erschwert eine Abschätzung der durchschnittlichen Oberflächentemperatur der Biomeiler. Vermutlich kann bei Windstärke 0 (Beaufort-Skala) die durchschnittliche Oberflächentemperatur der Deck- und Mantelfläche als ähnlich hoch betrachtet werden.

## Messungen

Bx1	Max	26,8 ° C
	Min	14,6 ° C
	Average	19,7 ° C
	Area	1,530 m <sup>2</sup>

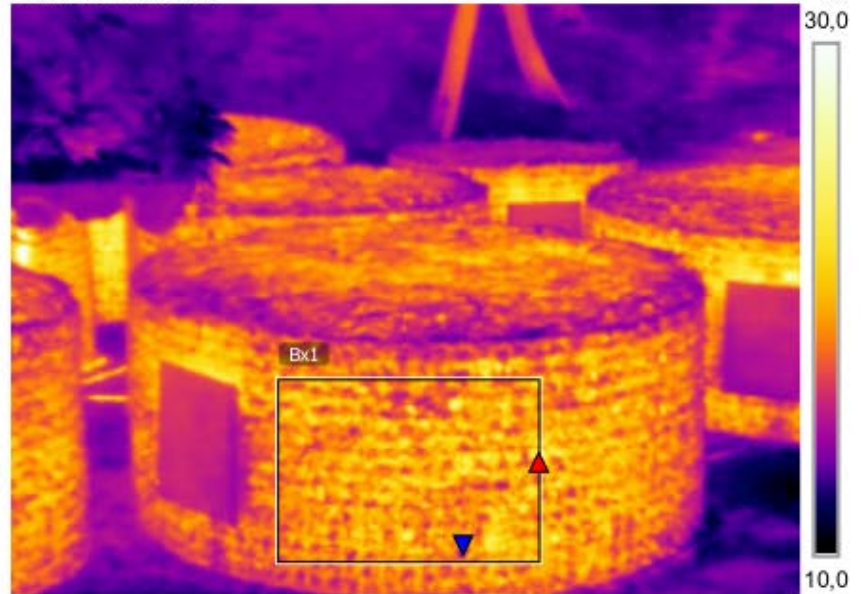
## Parameter

Emissionsgrad	0.85
Refl. Temp.	12 ° C

## Bildbeschreibung

Gesamtbild

15.05.2017 20:56:33



## Messungen

Bx1	Max	33,9 ° C
	Min	13,0 ° C
	Average	19,0 ° C
	Area	0,091 m <sup>2</sup>
Sp1		45,9 ° C

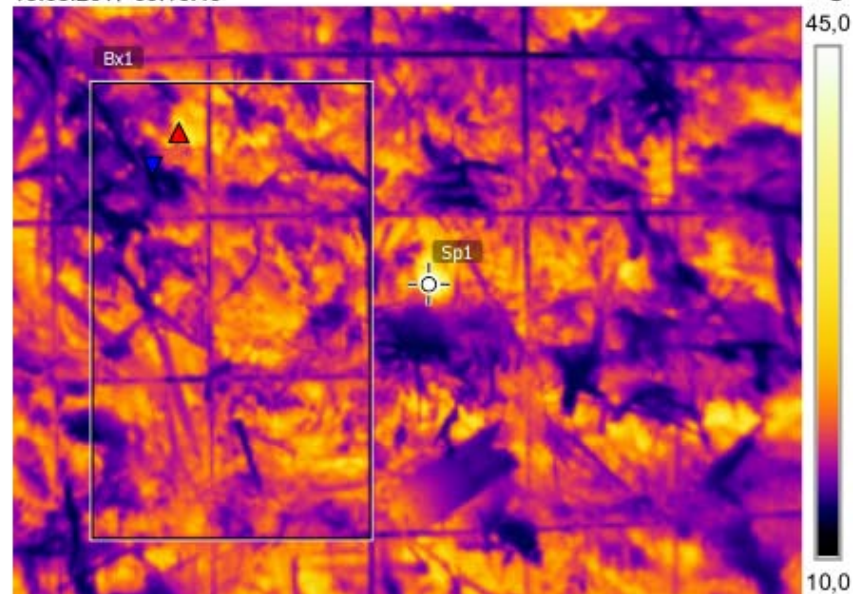
## Parameter

Emissionsgrad	0.85
Refl. Temp.	13.4 ° C

## Bildbeschreibung

Mantelfläche mit Einstich Gaslanze

16.05.2017 06:10:46



## Messungen

Bx1	Max	29,0 ° C
	Min	14,3 ° C
	Average	22,6 ° C
	Area	0,034 m <sup>2</sup>

## Parameter

Emissionsgrad	0.85
Refl. Temp.	13.6 ° C

## Bildbeschreibung

Deckfläche

16.05.2017 06:07:38

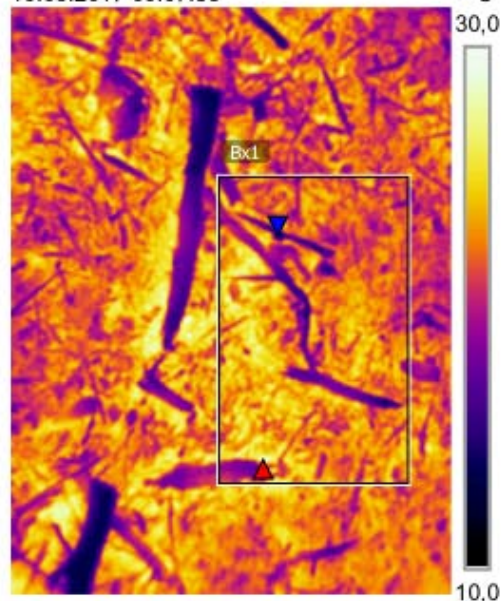


Abbildung 6.9: Oberflächentemperatur im Fern - und Nahbild von Mantel- und Deckfläche der Biomeiler

## 6.5 Untersuchung der Reaktionswärme und des Wärmeentzugs

### 6.5.1 Abhängigkeit von dem Biomeilervolumen

Zur Übersicht werden die Daten der Mittensensoren aller BM für den Versuchszeitraum  $t_V$  35-50 und 112-127 d in Boxplots dargestellt, siehe Abbildung 6.10.

**Ergebnisse** Biomeiler ohne Wärmeentzug besitzen ein deutlich höheres Temperaturniveau (Median 57 °C) im Vergleich zu BM mit WE (Median 45 bis 49 °C). Die Temperaturniveaus von BM 1B, 1C und 4B liegen unter 45 °C. Die Größen der Quantile und Whisker zeigen keinen Zusammenhang mit der Größe der Biomeiler (vgl. Tab 5.2).

Im Zeitverlauf sinkt der Medianwert der Temperatur im untersuchten Zeitabschnitt in Abhängigkeit von dem Biomeilervolumen:

- BM Gr. 1 um 5 - 10 K
- BM Gr. 2 und 3 um 2 K
- BM Gr. 4 um 0 K
- Referenz-BM 2C sinkt um 5 K

**Schlussfolgerungen** Das Temperaturniveau nach 35 Tagen Versuchszeit ist nicht abhängig vom Volumen der Biomeiler. Die BM 4B und 1C zeigen ein geringeres Temperaturniveau, da der Wärmeentzug sofort nach dem Aufbau der BM gestartet wird (vgl. Abschnitt 5.1.2.3) und keine Aufheizung der Biomeiler bis zur maximalen Temperatur stattfinden konnte. Das Milieu der Mikroorganismen bleibt im mesophilen Bereich, entsprechend können sich keine thermophilen Mikroorganismen vermehren. Das bestätigt die Annahme, dass mit dem Wärmeentzug erst ab dem Erreichen der thermophilen Phase begonnen werden darf, sofern ein thermophiler, aerober Abbau gewünscht ist (vgl. Abschnitt 4.2.2.4).

Die Größe der Quantile ist ein Indiz für die Temperaturschwankungen im untersuchten Zeitraum. Die Temperaturschwankungen sind dabei abhängig vom Abstand des Mittensensors zum WÜ aufgrund der unterschiedlichen  $d_{BM}$  (vgl. Abb. A.9 und A.10), der Höhe des Wärmeentzugs und der Qualität der Sensordaten (vgl. Abb. A.11).

BM mit geringerem Volumen  $< 30 \text{ m}^3$  fallen im Temperaturniveau im Zeitverlauf deutlicher ab, als BM mit einem Volumen von  $> 50 \text{ m}^3$ . Dies könnte mit dem höherem A:V-Verhältnis dieser Biomeiler begründet werden, denn die Rand- und Mittelzone besitzen einen höheren Anteil am Gesamtvolumen dieser BM. Aufgrund des schnelleren aeroben Abbaus und der Verringerung des Wassergehalts in der Randzone, führt dies im Zeitverlauf zu einer verminderten MO-Aktivität und Reaktionswärme  $\dot{Q}_R$  im Vergleich zu BM mit höheren Volumen.

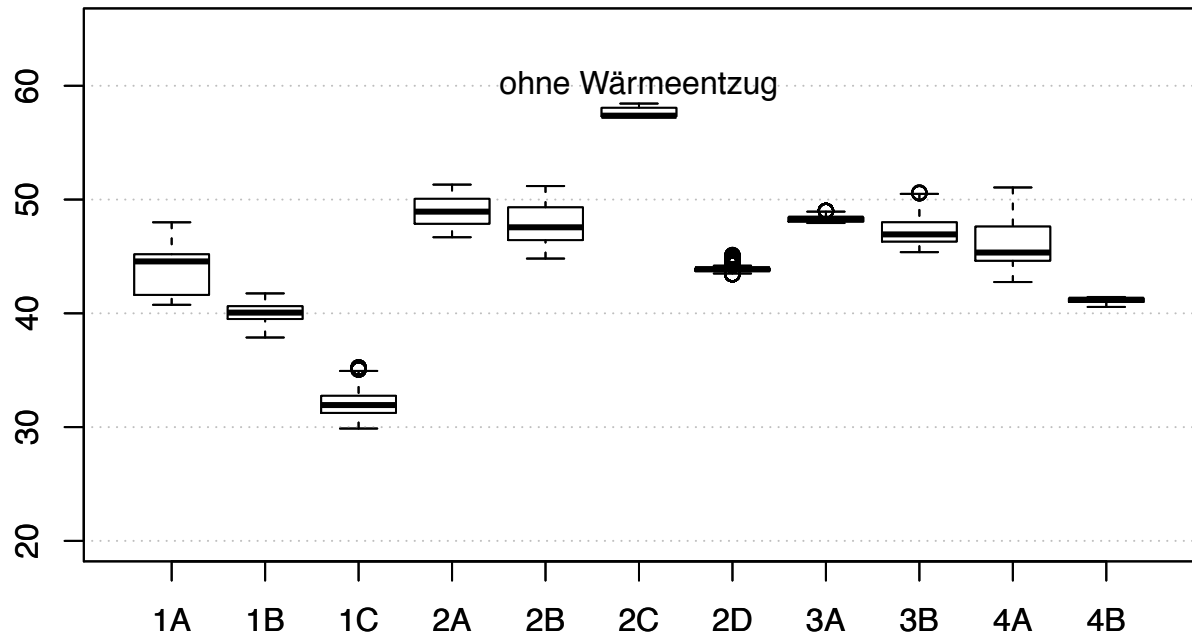
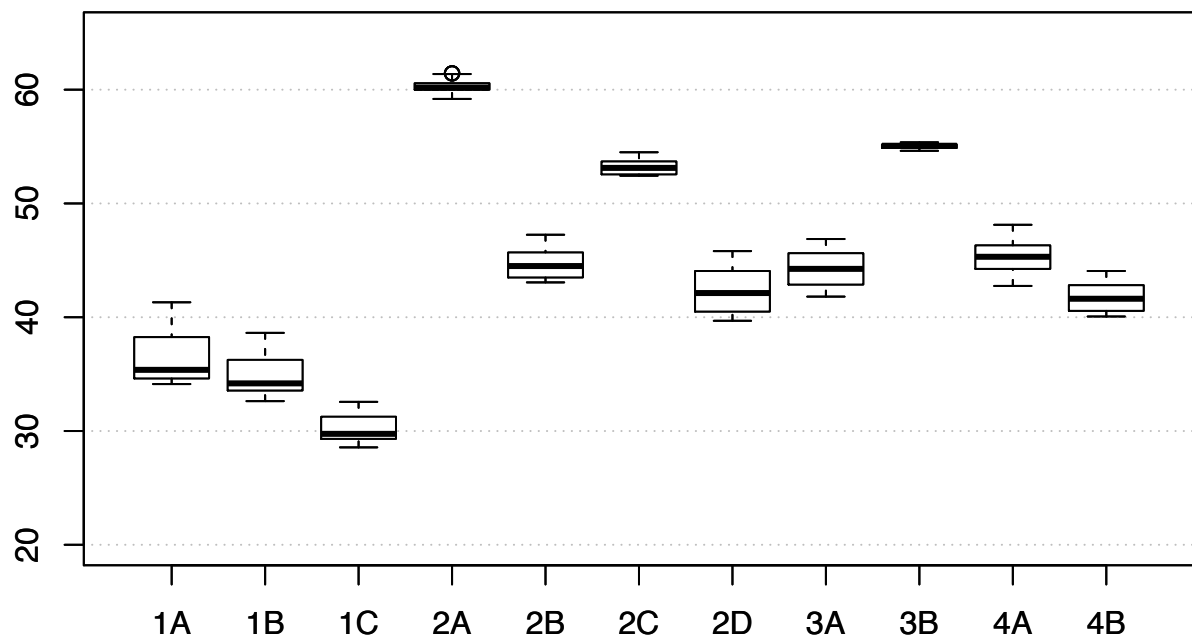
(a) Temperatur Mittensensoren,  $t_V = 35 - 50$  d(b) Temperatur Mittensensoren,  $t_V = 112 - 127$  d

Abbildung 6.10: Vergleich Temperaturniveau der Biomeiler

### 6.5.2 Abhängigkeit von der Steuerung des Wärmeentzugs

Die Steuerung des Wärmeentzugs ist in Abb. 5.7 und die Temperaturverläufe der BM Gr. 2 in Abb. 6.12 dargestellt. Die Temperaturdifferenzen zwischen den Schichten sind in Tab. 6.7 aufgetragen.

**Ergebnisse** Auffällig ist das stetige Abfallen und Steigen der Temperaturen im Rhythmus der **Pumpenlaufzeiten**. In Zeitabschnitten mit regelmäßigem WE betragen die Temperaturschwankungen bei BM 2D im Durchschnitt ca. 3 K und bei BM 2B im Durchschnitt ca. 5 K. In Zeitabschnitten  $> 10 d$  ohne WE steigen die Temperaturen zunächst steil und flachen im Zeitverlauf ab. Der Verlauf ist reziprok bei dauerhaften WE (siehe  $t_V$  115 bis 125).

**BM ohne WE** erreichen bis zu 67 °C in der oberen Schicht  $h_o$ . BM 2C erreicht seine maximale Temperatur  $\vartheta_{h_o}$  zwischen dem 30. und 60. Versuchstag. BM 2A erreicht seine maximale Temperatur  $\vartheta_{h_o}$  nach dem Ende des WE ebenfalls nach ca. 30 Tagen. Nach dem Erreichen der maximalen Temperatur sinken diese beständig bis 63 bzw. 57 °C. BM 2B steigt nach dem Ende des WE auf  $> 60$  °C auch nach 140 Tagen Versuchszeit und liegt somit höher als BM 2C ohne WE. Weiterhin auffallend ist die Annäherung der Temperaturen der oberen und mittleren Schicht ( $\Delta\vartheta_{h_o-h_m}$ ) bei BM ohne WE im Zeitverlauf. Dieses Verhalten ist nicht bei BM mit WE (BM 2D und 2B) und für  $\Delta\vartheta_{h_m-h_u}$  aller BM beobachtbar (vgl. Tabelle 6.6). Nach dem Erreichen der maximalen Temperatur zeigen BM ohne Wärmeentzug in der oberen Schicht Temperaturschwankungen  $\pm 1$  K im Rhythmus der Tagestemperaturen.

**BM mit WE** zeigen im Vergleich sehr ähnliche Verläufe mit ähnlichen Temperaturniveaus. Zur Überprüfung wird mit dem Statistikprogramm R ein Signifikanztest für den Zeitraum  $t_V$  38 - 116 d durchgeführt (vgl. Bedingungen Abschnitt B.8). Bei einer maximalen Abweichung von 2 bzw. 3 K besteht die Ähnlichkeit der Datensätze zu über 80 %, siehe Tabelle 6.7.

Tabelle 6.6: Temperaturdifferenz der WÜ Schichten im Zeitraum  $t_V$  38 - 116 d

		$\Delta\vartheta_{h_o-h_m}$ [ K]	$\Delta\vartheta_{h_m-h_u}$ [ K]
mit WE	2D	3,5	2,6
	2B	3,8	2,3
ohne WE	2A	4,7	8,3
	2C	1,5	7,0

Tabelle 6.7: Ähnlichkeit der schichtspezifischen Temperaturen von BM 2D und 2B mit WE

BM-Schicht	max. Abweichung $\Delta\vartheta$ [ °C]	$\alpha$ [%]
$h_o$	2	90,8
$h_m$	2	86,3
$h_u$	2	28,3
	3	94,3

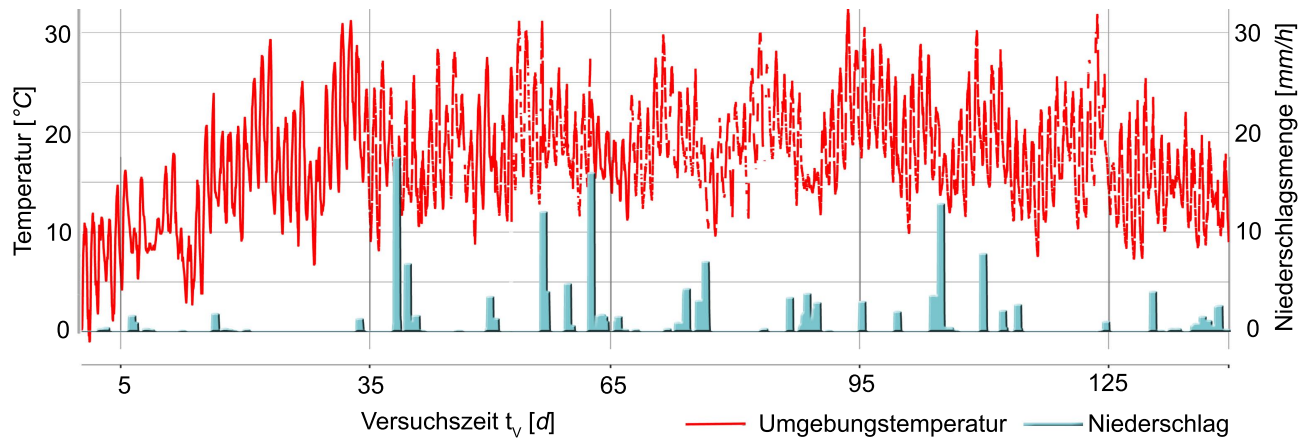


Abbildung 6.11: Wetterlage im Versuchszeitraum

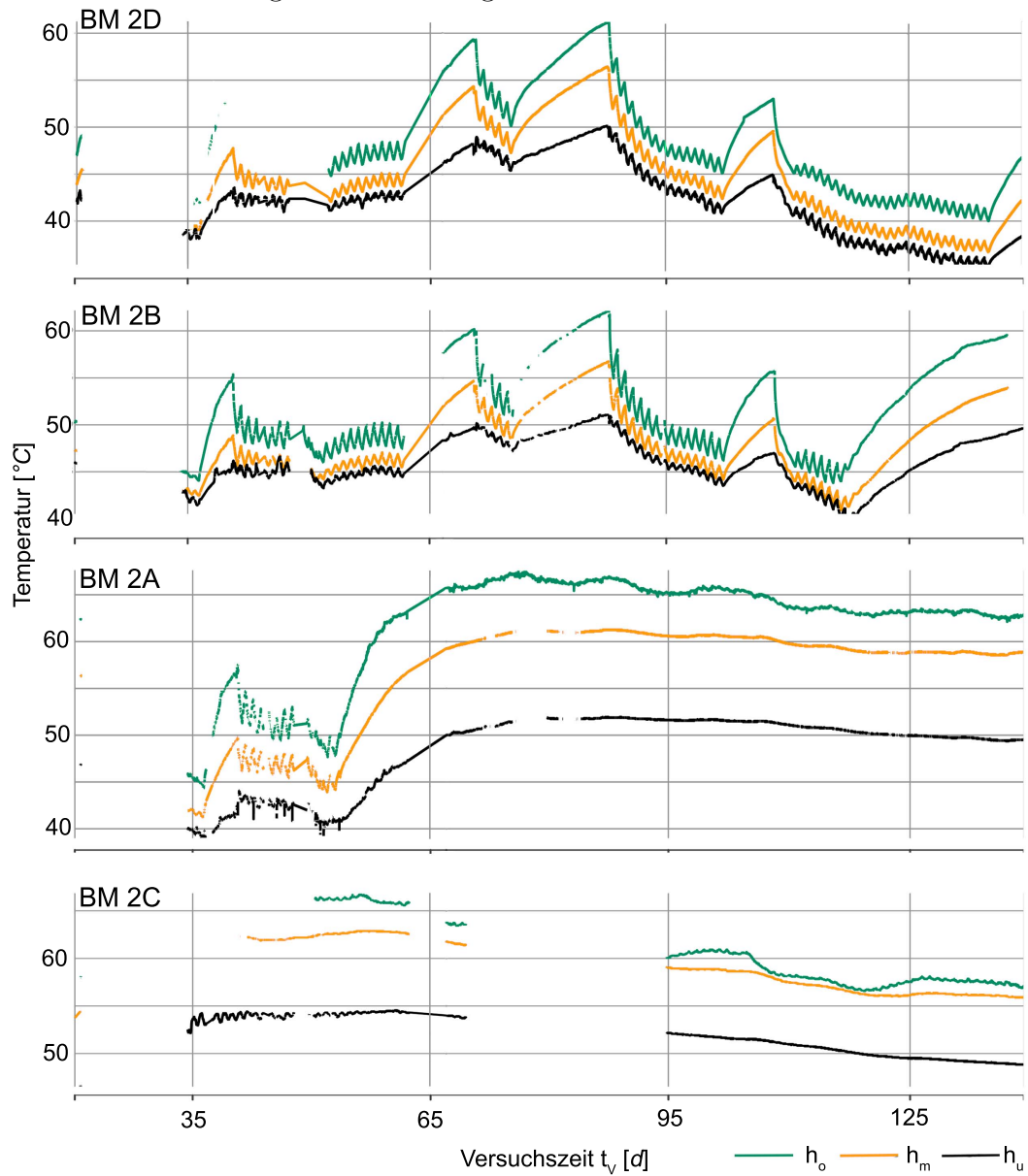


Abbildung 6.12: Temperaturverläufe der Biomeiler Gr. 2



**Schlussfolgerungen** Das Temperaturverhalten der BM ohne Wärmeentzug zeigt das zu erwartende Verhalten einer Kompostmiete (vgl. Abschnitt 3.4). Wird der Temperaturverlauf nach Veränderung des Wärmeentzugs als Sprungantwort bezeichnet, zeigt das Temperaturverhalten der BM mit WE deutlich  $pT_1$ -Verhalten: Das Laden und Entladen einer Kapazität. Es ist anzunehmen, dass die Steigung der Sprungantwort der örtlichen Reaktionswärme  $\dot{Q}_R$  entspricht und abhängig ist vom Temperaturniveau. Die Annäherung der Sprungantwort erfolgt jeweils an die schichtspezifische Höchsttemperatur und entspricht der maximalen, örtlichen Kapazitätsladung. Für  $h_o$  entspräche dies  $67^\circ\text{C}$  (siehe BM 2A Abb. 6.12). Dieses Verhalten ist zeit-invariant und erfolgt auch nach 140 Tagen Versuchszeit (siehe BM 2B Abb. 6.12). Deswegen könnte angenommen werden, dass die Reaktionswärme  $\dot{Q}_R$  bei BM mit WE im Zeitverlauf gleich bleibt, während sie bei BM ohne WE sinkt. Dies bestätigt die Annahme, dass MO bei Temperaturen  $> 65^\circ\text{C}$  sterben und das Milieu zu langsam-wachsenden MO wechselt, z.B. Pilze ( $\dot{Q}_R$  geringer).

Das stärkere Absinken von  $\vartheta_{h_o}$  bei BM ohne WE lässt sich auf die Austrocknung der Randzone zurückführen und bestätigt die Erkenntnisse aus Abschnitt 6.4. Auch die Schwankungen mit dem Tagesgang der Umgebungstemperatur bestätigen Erfahrungswerte [96] von einer Ausweitung der Randzone im Zeitverlauf bis zu 1 m Abstand von der Reaktorgrenze.

Die BM mit WE zeigen trotz unterschiedlichem Volumenstrom und Vorlauftemperaturen den gleichen Temperaturverlauf. Die Reaktionswärme  $\dot{Q}_R$  scheint somit vergleichbar zu sein. Entsprechend wirken sich Unterschiede von  $\dot{V} \pm 1 \text{ L/min}$ ,  $\vartheta_r \pm 3 \text{ K}$  bzw. 2 kW Wärmeentzug nicht signifikant auf den biochemischen Prozess aus.

### 6.5.3 Auswertung der Wärmeleistung

In Tab. 6.8 sind die mittleren Wärmeleistungen der BM für vier verschiedene Zeiträume dargestellt. Die Datensatzanzahl variiert aufgrund der Sensorqualität (vgl. Abschnitt 5.2.2.1). Für die Auswertung können die Daten von ca. 35 von insgesamt 140 Versuchstagen einbezogen werden. Dies entspricht 25 % der Versuchszeit in denen sowohl die Pumpen als auch die Volumenstrom-Sensoren aktiv sind und die Leistungsabnahme dokumentiert werden kann (vgl. Abbildung 5.7). Deswegen kann kein Verlauf der Leistungsabnahme  $\dot{Q}_{nutz}(t_V)$  und Wärmemenge  $Q_{nutz}(t_V)$  dargestellt werden.

**Ergebnisse** Die mittleren Wärmeleistungen  $\dot{Q}_{nutz}$  betragen bis 5,2 kW, wobei Leistungen  $> 2 \text{ kW}$  nur von BM 2D (2,3 kW,  $t_V > 96 \text{ d}$ ), BM 4A (5,2 kW,  $t_V > 96 \text{ d}$ ) und BM 4B (3,6 kW,  $t_V > 109 \text{ d}$ ) erreicht werden. Die Wärmeleistungen der BM Gr. 1 zeigen bei gleichbleibenden Bedingungen die Tendenz zum Abfallen. Die Wärmeleistungen BM Gr. 2 und 4 zeigen eine Tendenz zum Ansteigen, sofern die Prozessbedingungen vergleichbar sind. Die Standardabweichungen der Wärmeleistungen  $\sigma_{\dot{Q}_{nutz}}$  entsprechen im Mittel ca. 35 % der Wärmeleistung. Die Volumenströme variieren je nach BM und Zeitraum zwischen ca. 3,5 und 10 L/min und sind in Einzelfällen  $< 2 \text{ L/min}$ .



Tabelle 6.8: Wärmeleistung der Biomeiler in verschiedenen Versuchszeiträumen

BM		$t_V$ [d]	Datensatz- anzahl	$\overline{\vartheta_{h_u}}$ [°C]	$\overline{\vartheta_{h_m}}$ [°C]	$\overline{\vartheta_{h_o}}$ [°C]	$\overline{\vartheta_v}$ [°C]	$\overline{\vartheta_r}$ [°C]	$(\overline{\vartheta_v} - \overline{\vartheta_r})$ [K]	$(\overline{\vartheta_{h_m \vee h_u}} - \overline{\vartheta_r})$ [K]	$\overline{V}$ [L/min]	$\overline{\dot{Q}_{nutz}}$ [kW]	$\overline{\sigma_{\dot{Q}_{nutz}}}$ [kW]	$\dot{q}_{nutz}$ [W/kg <sub>TS</sub> ]	$q_{nutz}$ [MJ/kg <sub>TS</sub> ]			
1	A	34 – 43	46	39,1	40,7	42,8	38,1	33,7	4,4	5,4	6,16	1,93	0,77	0,3	6,9			
		52 – 62	669	40,5	41,2	43,6	40,2	35,6	4,6	5,0	5,05	1,58	0,31					
		96 – 105	438	37,4	39,0	40,7	38,2	32,5	5,7	4,9	1,23	0,49	0,25					
		109 – 112	196	38,3	39,9	42,2	39,6	33,3	6,2	4,9	0,49	0,22	0,25					
	B	34 – 43	18	NA	39,5	NA	37,7	36,0	1,7	3,4	8,31	0,97	0,51	0,1	2,8			
		52 – 62	616	NA	40,5	NA	39,0	37,5	1,6	3,1	7,73	0,83	0,20					
		96 – 105	1001	NA	40,5	NA	38,3	37,0	1,3	3,6	5,68	0,52	0,15					
		109 – 112	724	NA	41,6	NA	39,4	37,5	1,9	4,1	3,81	0,50	0,11					
	C	34 – 43	86	NA	33,5	NA	30,4	29,4	0,9	4,1	10,26	0,67	0,25	0,1	2,3			
		52 – 62	669	NA	33,2	NA	31,0	30,3	0,7	2,9	10,24	0,51	0,11					
		96 – 105	477	NA	33,8	NA	31,4	30,8	0,6	3,0	10,39	0,42	0,15					
		109 – 112	368		35,2		32,3	31,7	0,6	3,4	10,40	0,42	0,08					
2	A	34 – 43	202	41,4	44,7	49,8	44,2	40,6	3,6	1,2	5,90	1,46	0,42	0,2	3,2			
		52 – 62	161	44,6	45,7	47,9	44,1	43,2	1,0	1,5	7,71	0,53	0,09					
	B	34 – 43	59	43,0	45,1	47,9	43,1	42,2	0,9	1,8	7,73	0,50	0,16	0,0	1,0			
		96 – 105	153	44,8	45,7	47,7	43,5	42,6	0,9	2,1	6,94	0,44	0,10					
	C	109 – 112	164	44,9	45,9	48,1	43,9	42,9	1,1	2,0	6,70	0,49	0,07					
		kein Wärmeentzug																
	D	34 – 43	271	41,0	42,9	42,0	41,8	40,0	1,8	1,0	8,15	1,01	0,34	0,1	2,4			
		52 – 62	353	41,9	43,2	46,3	42,8	41,1	1,7	0,8	8,13	0,93	0,24					
		96 – 105	1152	42,3	44,1	46,7	43,4	38,5	4,8	3,8	8,03	2,67	1,07					
		109 – 112	396	43,7	46,3	49,2	45,0	39,7	5,3	4,0	7,72	2,86	0,97					
3	A	34 – 43	250	43,6	47,0	48,6	41,3	40,4	0,9	3,2	4,03	0,26	0,19	0,1	1,2			
		52 – 62	356	43,9	47,0	48,7	42,2	40,7	1,4	3,2	3,55	0,35	0,21					
		96 – 105	270	41,8	46,0	47,2	44,5	34,3	10,3	7,6	1,03	0,72	0,07					
		109 – 112	239	42,5	46,9	47,3	44,3	34,0	10,3	8,6	0,89	0,63	0,07					
	B	34 – 43	155	44,0	48,2	48,4	43,1	43,1	0,0	0,8	7,99	-0,02	0,16	0,0	0,4			
		52 – 62	261	46,1	49,0	48,9	44,7	44,1	0,6	2,0	7,48	0,30	0,10					
4	A	34 – 43	39	NA	43,8	NA	37,1	38,4	1,3	6,7	7,67	0,71	0,62	0,3	6,4			
		52 – 62	201	NA	44,2	NA	38,7	39,9	1,2	5,5	7,49	0,60	0,15					
		96 – 105	1015	NA	45,2	NA	30,8	40,4	9,5	14,4	7,98	5,23	0,80					
		109 – 112	745	NA	45,4	NA	40,7	31,6	9,2	13,9	8,03	5,05	0,85					
	B	34 – 43	156	NA	44,4	NA	34,8	37,7	2,9	9,6	7,05	1,44	0,55	0,2	4,1			
		52 – 62	459	NA	45,0	NA	37,2	39,2	2,0	7,7	7,27	0,98	0,20					
		96 – 105	389	NA	45,4	NA	38,2	40,2	1,9	7,1	7,47	0,99	0,31					
		109 – 112	245	NA	46,2	NA	40,9	34,7	6,2	11,4	8,22	3,64	2,12					
		Mittelwerte								3,2	4,7	6,58	1,18			0,37		

Die **Temperaturdifferenzen** zwischen Vorlauf  $\vartheta_v$  und Rücklauf  $\vartheta_r$  betragen im Mittel ca. 3 K und sind bei 15 % der untersuchten Zeit  $> 5$  K. Die Rücklauftemperaturen liegen meist deutlich über 35 °C. Die mittleren Temperaturdifferenzen zwischen dem Rücklauf  $\vartheta_r$  und der untersten bemessenen Biomeilerschicht ( $\overline{\vartheta_{h_m \vee h_u}} - \vartheta_r$ ) betragen nur in 20 % der untersuchten Zeit  $> 5$  bzw. 7 K.

Die **substratspezifische Wärmeleistung**  $\dot{q}_{nutz}$  wird auf Basis der höchsten Wärmeleistung des Biomeilers im Versuchszeitraum errechnet und beträgt bis 0,3 W/kg<sub>TS</sub>. Sie zeigt keine Abhängigkeit vom Biomeilervolumen. Die entzogene, substratspezifische Wärmemenge  $q_{nutz}$  ergibt aus dem Wärmeentzug mit höchster Wärmeleistung kontinuierlich über 8 Monate Heizperiode im 12h-Rhythmus (übliche Betriebsweise) mit bis zu 7 MJ/kg<sub>TS</sub>.

**Schlussfolgerungen** Das stärkere Absinken der Wärmeleistung  $\dot{Q}_{nutz}$  der Biomeiler  $< 30$  m<sup>3</sup> im Zeitverlauf bestätigt die Annahme aus Abschnitt 6.5.1: Das ungünstigere A:V-Verhältnis bei Biomeilern mit geringerem Volumen führt zu einer Verringerung der Reaktionswärme  $\dot{Q}_R$  in Rand- und Mittelzone und weniger Wärmeleistung kann abgenommen werden. Zusätzlich dazu könnte die Austrocknung dieser Bereiche zu einer geringeren Wärmekapazität und -leitfähigkeit und somit einem verminderten Wärmeübergang zum WÜ führen. Da allerdings dieselbe substratspezifische Wärmeleistung  $\dot{q}_{nutz}$  bei Biomeilern mit geringem und hohem Volumen nachgewiesen werden kann, wird folgende These aufgestellt: Biomeiler mit höherem Volumen setzen nicht linear mehr Reaktionswärme frei, sie halten aber das Niveau über einen längeren Zeitraum als Biomeiler mit geringerem Volumen.

Die in diesem Versuch erreichten maximalen Wärmeleistungen liegen ca. 10 % unter den aus der Literatur zu erwartenden Werten (Faustregel: 1 kW für 10 m<sup>3</sup>) und sind nicht über den gesamten Zeitraum nachweisbar. Es ist davon auszugehen, dass die Biomeiler in diesem Versuch nicht optimal betrieben werden ( $\dot{V}$ ,  $\vartheta_r$ ). Die errechneten Maximalwerte bezüglich der substratspezifischen Wärmeleistung  $\dot{q}_{nutz}$  und Wärmemenge  $q_{nutz}$  liegen wenig unter den Angaben aus der Literatur, siehe Abschnitt 4.3.3. Die errechnete substratspezifische Wärmemenge  $q_{nutz}$  bei üblicher Betriebsweise entspräche einem Wärmeentzug von ca. 80 % des Heizwerts des Substrats  $H_S$  in 8 Monaten (vgl. Abschnitt 6.2.3). Aufgrund der Schwankungen der Wärmeleistungen und den hohen Rücklauftemperaturen im Versuchszeitraum wäre ein solches Ergebnis auch bei längerer Versuchszeit nicht durch Messwerte nachweisbar gewesen.

Aufgrund der hohen Rücklauftemperaturen  $\vartheta_r$ , hohen Volumenströme  $\dot{V}$  und den geringen Differenzen zwischen Vor- und Rücklauftemperatur kann das mögliche Potential der Biomeiler durch die Versuche nicht erfasst werden. Es können keine Aussagen bezüglich der in einem Heizbetrieb realisierbaren Wärmeleistungen der BM in der Gesamtheit getroffen werden. Jedoch wäre aus den vorhandenen Ergebnissen eine Verwendung bsp. für eine Fußbodenheizung denkbar ( $\vartheta_v = 45 - 50$  °C,  $\overline{\vartheta_v} - \vartheta_r = 5$  K).

Als Voraussetzung für hohe bzw. konstante Wärmeleistungen ist ein Optimum aus Volumenstrom und Vorlauftemperatur für den Betrieb eines Biomeilers anzunehmen. Für eine spezifischere Analyse wird eine Korrelationsmatrix erstellt (siehe Abschnitt 6.5.4 und Abb. 6.13).

## 6.5.4 Identifikation von Einflussfaktoren

### 6.5.4.1 Abhängigkeiten der Parameter

Die für die Korrelation verwendeten Daten ergeben sich aus Tabelle 5.2 und 6.8. Die Korrelationen mit den Temperaturen der Reaktoroberfläche und der Umgebungsluft entfallen aufgrund der gleichbleibenden Bedingungen im Versuchszeitraum (vgl. Abschnitt 6.1). In Abbildung 6.13 sind die Korrelationsdiagramme im oberen Feld dargestellt und mit einer lokal gewichtete Streudiagramm-Glättung ( $f = 1$ ) versehen (rote Linie). Die Korrelationskoeffizienten zeigen das Bestimmtheitsmaß für eine lineare Abhängigkeit (Pearson) im unteren Feld gespiegelt zur diagonalen Mittelachse an. Nicht-lineare Abhängigkeiten werden visuell ausgewertet.

**Testabhängigkeiten** ergeben sich aus zu erwartenden Korrelationen:

- indirekte Abhängigkeit von Volumenstrom  $\dot{V}$  und Vorlauftemperatur  $\vartheta_v$
- direkte Abhängigkeit von Leistung  $\dot{Q}$  zur Temperaturdifferenz Vorlauf zu Rücklauf

**Konstruktive Abhängigkeiten** ergeben sich aus systematischen Fehlern und Verfahrensunterschieden im Versuchsaufbau:

- direkte Abhängigkeit von Personenanzahl beim Aufbau zum Volumen der Biomeiler, da kleinere BM von weniger Personen aufgebaut werden
- direkte Abhängigkeit von Personenanzahl zum Wassergehalt: Je größer die Personenanzahl, desto eher hatte eine Person zeitliche Kapazitäten den BM zu wässern
- direkte Abhängigkeit von dem Fertigstellungszeitpunkt zum Volumenstrom, da bei denselben Pumpeinstellungen die Kreisläufe stabiler sind, die mit mehr Routine aufgebaut werden (Dichtungen und Luft im Heizkreislauf)
- Abhängigkeit von Fertigstellungszeitpunkt zur Vorlauftemperatur, da BM Gr. 4 später aufgebaut wurden und aufgrund des sofortigen Wärmeentzugs zunächst ein geringes Temperaturniveau zeigen
- direkte Abhängigkeit von Vor- und Rücklauftemperatur aufgrund einer fehlenden Senke im Heizkreislauf
- direkte Abhängigkeit von der Temperatur der mittleren Schicht  $\vartheta_{h_m}$  und der Vorlauftemperatur  $\vartheta_v$ , da der WÜ geeignet ist um dem BM Wärmeenergie zu entziehen

**Abhängigkeiten der Wärmeleistung** zeigen sich

- nichtlinear vom Volumenstrom  $\dot{V}$ , maximal bei ca. 6-8 L/min
- direkt linear bezüglich der Differenz von Rücklauftemperatur  $\vartheta_r$  zur untersten bemessenen Biomeilerschicht  $\vartheta_{h_u}$  bzw.  $\vartheta_{h_m}$
- nichtlinear bezüglich dem Temperaturniveau der mittleren Schicht  $\vartheta_{h_m}$
- linear bezüglich des Volumens, da die BM Gr. 2 und 4 besonders bei  $t_v > 80$  Tage höhere Leistungen erzielen als BM Gr. 1

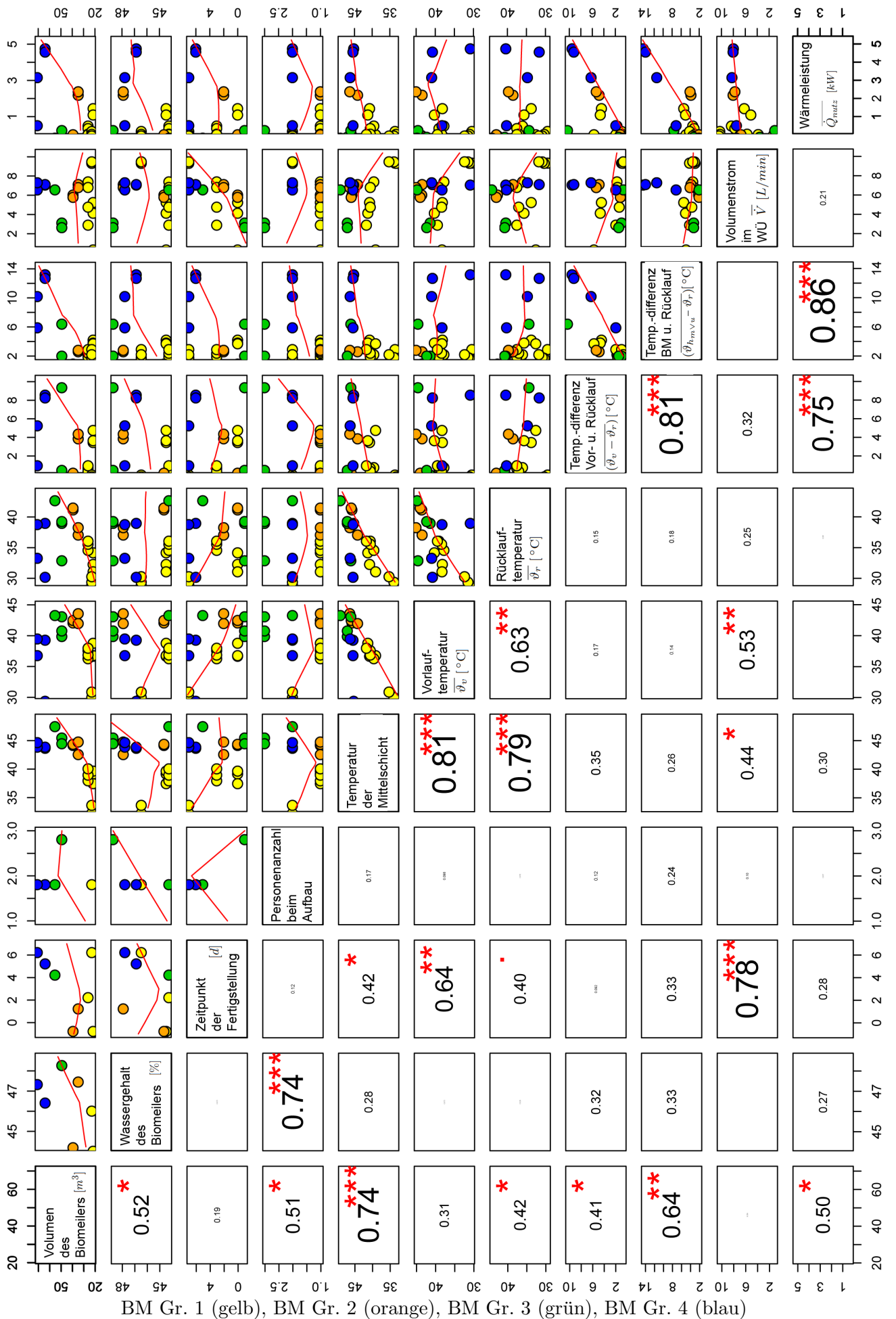


Abbildung 6.13: Korrelationsmatrix mit Korrelationskoeffizient (Pearson) und p-Wert (Sterne)

**Schlussfolgerungen** Die identifizierten Einflussfaktoren sind bezüglich der Steuerung des Wärmeentzugs zu erwarten. Gezeigt werden kann, dass der WÜ prinzipiell geeignet ist, um Wärmeenergie aus dem Biomeiler zu entziehen. Überraschend deutlich hat die Aufbauqualität (Personenanzahl, Fertigstellungszeitpunkt, Leistungsbereitstellung der Pumpen) einen Einfluss auf die mögliche Wärmeleistung der Biomeiler.

Eine Fehlinterpretation des Einflusses des Volumens wird dadurch verursacht, dass BM Gr. 4 erst nach ca. 80 Versuchstagen und Pumpenausfällen von  $> 10$  Tagen die Leistungen  $> 2$  kW erzielen (vgl. Abb. 5.7). Weiterhin besitzen diese Biomeiler den notwendigen stabilen Volumenstrom und Rücklauftemperaturen, sodass ein Vergleich mit der Wärmeleistung von Biomeilern anderer Größenkategorie erschwert wird.

Aus dem Versuch wird deutlich, dass die Art und Steuerung des Wärmeentzugs prozessbestimmend ist. Für diesen Versuch bringen ein Volumenstrom von 8 L/min und Temperaturdifferenzen von Rücklauf zu Biomeiler von 14 K die höchsten Wärmeleistungen. Wobei anzunehmen ist, dass bei zu geringen Rücklauftemperaturen  $\vartheta_r$  verbunden mit hohen WÜ-Durchfluss  $\dot{V}$  und zu hohem Wärmeentzug  $\dot{q}_{nutz}$  der biochemische Abbauprozess kippt. Für einen thermophilen Prozess ist es notwendig, dass das Temperaturniveau des Biomeilers 45 °C in der mittleren Schicht  $\vartheta_{h_m}$  nicht unterschreitet. Diese Werte ergeben sich aus der Auswertung und wurden nicht systematisch untersucht. Sie können zur Orientierung für weitere Versuche dienen.

#### 6.5.4.2 Einfluss der Umgebungsbedingungen

**Ergebnisse** Wie in Abschnitt 6.1 nachgewiesen, ist das Versuchsfeld windgeschützt. Aufgrund der Anordnung der Biomeiler und der baumbestandenen Senke ist kein Biomeiler besonders bezüglich der Sonne exponiert (vgl. Abb. 5.1). Entsprechend gibt es keine Biomeiler im Versuchsaufbau die sich bezüglich ihrer Umgebungsbedingungen signifikant unterscheiden.

Temperaturschwankungen von  $\pm 1$  K im Tagesgang werden im Abschnitt 6.5.2 nachgewiesen bis in 1 m Abstand zur Deckfläche des Reaktors bzw. 1 m Abstand zur Mantelfläche in der oberen Schicht  $h_o$ . Weiterhin kann ein Schwanken der Gaskonzentration  $G$  in 0,2 m Einstichtiefe von der Deckfläche und von der Mantelfläche  $h_o$  an windexponierten Messstellen in Abhängigkeit von der Windstärke nachgewiesen werden (siehe Abschnitt 5.2.4).

**Schlussfolgerungen** Aufgrund der geschützten Lage ist der Versuchsstandort nicht geeignet, um den Einfluss von den Umgebungsbedingungen auf den Biomeiler systematisch nachzuweisen. Den Einfluss der Temperaturschwankungen mit dem Tagesgang oder der Windstärke auf die obere Schicht  $h_o$  kann in Biomeilern ohne Wärmeentzug und in der Randzone nachgewiesen werden.

## 6.6 Ansatz zur Erweiterung eines Modells

### 6.6.1 Auswahl des Modells

*„Die logisch nicht weiter reduzierbaren Grundbegriffe und Grundgesetze bilden den unvermeidlichen, rational nicht erfassbaren Teil der Theorie. Vornehmstes Ziel aller Theorie ist es, jene irreduziblen Grundelemente so einfach und so wenig zahlreich als möglich zu machen, ohne auf die zutreffende Darstellung irgendwelcher Erfahrungsinhalte verzichten zu müssen.“[107]*

[43] entwickelt basierend auf einem sehr umfangreichen, deterministischen Modell eine zeitvariante, raumkontinuierliche Simulation. Diese enthält die wichtigsten physikalischen, chemischen und biologischen Gesetzmäßigkeiten und kann sowohl substrat-, milieu- und belüftungsspezifische Ereignisse abbilden (siehe Abbildung 4.1). Damit ist dieses Modell das bisher umfangreichste unter den Veröffentlichungen. Eine Erweiterung dieses Modells bezüglich des Wärmeentzugs mit internen Wärmeübertragern und einer raumdiskreten Verteilung der Zustandsgrößen wäre wünschenswert für die Fragestellungen dieser Arbeit. Im Folgenden werden Aspekte einer Erweiterung benannt.

### 6.6.2 Wärmebilanz

In Abbildung 6.14 und Gleichung 6.3 ist die Wärmebilanz dargestellt, welche für die Modellierung eines in dieser Arbeit untersuchten Biomeilers vorgeschlagen wird. Dabei ergibt sich die Wärmeleistung des Biomeilers  $\dot{Q}_{nutz}$  aus der Reaktionswärme  $\dot{Q}_R$  und dem zugeführten Wärmestrom  $\dot{Q}_{zu}$  (Sonnenstrahlung) abzüglich der Verluste über die Oberfläche  $\dot{Q}_V$  und Konvektion  $\dot{Q}_{konv}$  und Speicherwärme  $\dot{Q}_{Spei}$ .

Aus den in der Auswertung der Feldversuche ausführlich erläuterten Erkenntnissen (siehe Abschnitt 6.4) wird angenommen, dass bei ausgebildeter Isolation (Wärmeleitfähigkeit der Reaktorgrenze  $\lambda < 0,1 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ) keine Wärmeleitung in den Festbettreaktor stattfinden und entsprechend  $\dot{Q}_{zu} = 0$  gilt. Aus diesem Grund sind ebenfalls die Wärmeverluste durch Wärmeleitung und -strahlung über die Reaktoroberfläche zu vernachlässigen. Bei geringen Windstärken  $w$  wäre  $\dot{Q}_V = 0$ . Weiterhin wäre eine quasi-statische Betriebsweise des Wärmeentzugs anzustreben, d.h.  $\dot{Q}_{Spei} = 0$ . Entsprechend vereinfacht sich die Wärmebilanz bezüglich der Versuchszeit  $t_v \rightarrow \infty$  (Isolation) und quasi-statischer Betriebsweise zu Gl. 6.4.

$$|\dot{Q}_{nutz}| = |\dot{Q}_R| + |\dot{Q}_{zu}| - |\dot{Q}_V| - |\dot{Q}_{konv}| - |\dot{Q}_{Spei}| \quad (6.3)$$

$$|\dot{Q}_{nutz}| = |\dot{Q}_R| - |\dot{Q}_{konv}| \quad (6.4)$$

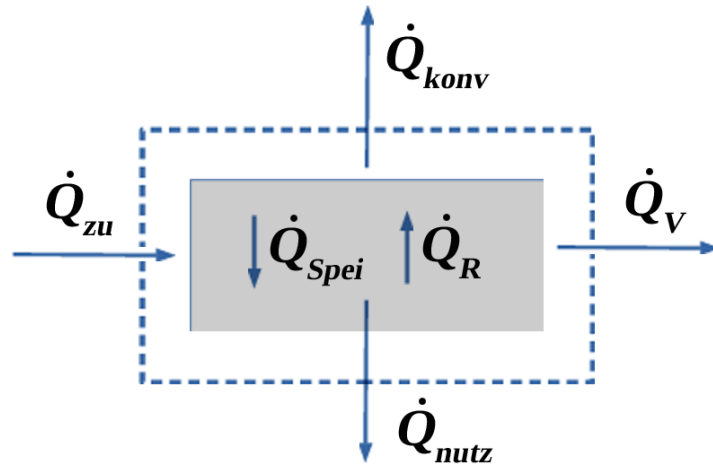


Abbildung 6.14: Bilanzraum für die Wärmebilanz eines Biomeilers

**Die Spezifizierungen** der Wärmeströme können wie folgt vorgenommen werden:

$$\dot{Q}_{nutz} = f(\dot{V}, \vartheta_r, A_W, \dot{Q}_R, \dot{Q}_{zu}, \dot{Q}_V, \dot{Q}_{konv}, \dot{Q}_{Spei}) \quad (6.5)$$

$$\dot{Q}_R = f(t_V, M) \text{ vgl. [43]} \quad (6.6)$$

$$\dot{Q}_{zu} = f(A_{solar}, t_s, s, \lambda) \text{ Sonneneinstrahlung auf Reaktorgrenze vgl. [108]} \quad (6.7)$$

$$\dot{Q}_V = f(\lambda, s, \vartheta_U) \text{ Wärmeleitung der Randzone vgl. [62]} \quad (6.8)$$

$$\dot{Q}_{konv} = f(\zeta, \vartheta_U, w) \text{ Wind und Kamineffekt vgl. [30]} \quad (6.9)$$

$$\dot{Q}_{Spei} = m * c_m * \frac{\delta \vartheta}{\delta t_V} \text{ vgl. [6]} \quad (6.10)$$

**Die inneren Größen** und ihre Abhängigkeiten werden wie folgt bestimmt:

$$\text{Temperatur} = \vartheta(W, M, \varrho, h, s, t_V) \quad (6.11)$$

$$\text{Wassergehalt} = W(\vartheta, \varrho, h, s, t_V) \quad (6.12)$$

$$\text{Gaskonzentration} = G(W, M, \vartheta, \varrho, h, s, t_V) \quad (6.13)$$

$$\text{Milieu} = M(G, W, \text{C:N}, \vartheta, \varrho, h, s, t_V) \quad (6.14)$$

$$\text{C:N-Verhältnis} = \text{C:N}(M, t_V) \quad (6.15)$$

$$\text{Schüttdichte} = \varrho(M, h, t_V) \quad (6.16)$$

$$\text{Höhe des Reaktors} = h_{BM}(\text{C:N}, t_V) \quad (6.17)$$

$$\text{Wärmeleitfähigkeit} = \lambda(W, \vartheta, \varrho, h, s, t_V) \quad (6.18)$$

$$\text{mittlere spez. Wärmekapazität} = c_m(W, \varrho, h, s, t_V) \quad (6.19)$$

### 6.6.3 Räumliche Verteilung der Zustandsgrößen

Die für die Modellierung vereinfachten, räumlich-diskreten Eigenschaften beinhalten den deutlich anaeroben Milieubereich ( $CO_2 > 25 \%$ ), veränderten Nährstoffabbau durch Methanbildner ( $CH_4 > 15 \%$ ) und die Bereiche mit den höchsten Temperaturen für den Wärmeentzug

( $\vartheta > 45\text{ °C}$ ). Abbildung 6.15 skizziert die räumliche Verteilung zum Zeitpunkt  $t_V = 30\text{ d}$ . In Relation zu der Schüttdichte findet im Zeitverlauf eine Verschiebung der skizzierten Zonen zur Mittelachse und Bodenfläche des Biomeilers statt. Die Abhängigkeit des raumdiskreten Verhaltens sind wie folgend:

- Temperatur  $\vartheta$ : Wärmeglocke im Bereich hoher Reaktionswärme  $\dot{Q}_R$  und wenig Wärmeverlust durch Konvektion  $\dot{Q}_{konv}$  und Wärmeleitung  $\dot{Q}_V$
- Methan  $CH_4$  im anaeroben Milieu, abhängig von der Belüftung  $\dot{Q}_{konv}$ , Kamineffekt und Nährstoffkonzentration  $N$
- Kohlenstoffdioxid  $CO_2$  abhängig von der Belüftung  $\dot{Q}_{konv}$  und Kamineffekt
- Schüttdichte  $\rho$  in Abhängigkeit von der Höhe  $h_{BM}$

#### 6.6.4 Wärmeübertragung zum WÜ

Die ideale Wärmeübertragung zum WÜ geschieht in 3 Stufen:

- Wärmeübertragung auf den WÜ mittels Wärmeleitung und Konvektion
- Wärmeleitung im Material des WÜ
- Wärmeübertragung auf Kühlflüssigkeit mittels Konvektion

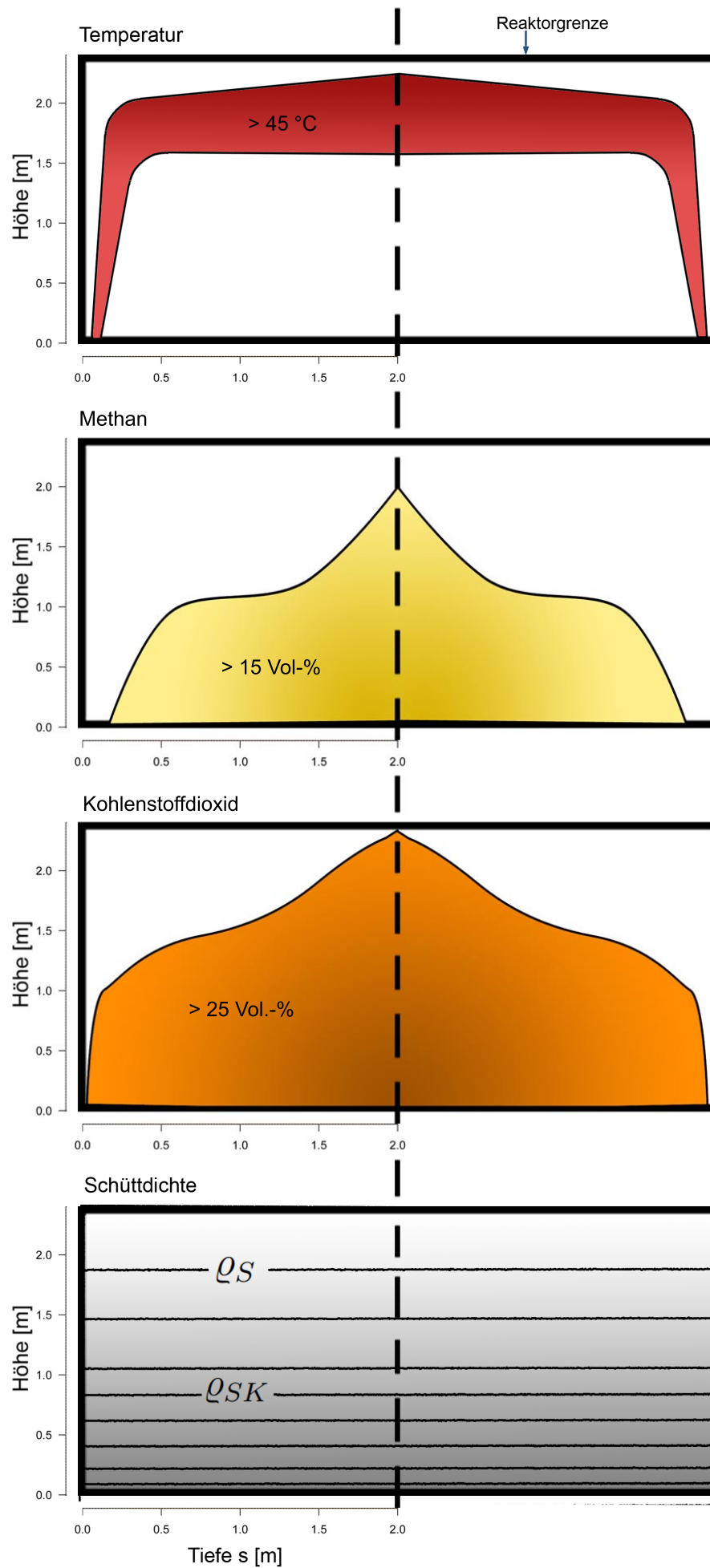
Dabei handelt es sich bei dem Substrat um ein Drei-Phasen-System (fest, flüssig, gasförmig). Der Wärmeübergang am WÜ kann nur abgeschätzt werden und ist abhängig von der Schichthöhe  $h_{u..o}$ . Unstetigkeiten wie bsp. Störungen in der Struktur durch Überlappung der Rohrschleifen, große Aststücken, Einbauten, Sensorrohre oder Silonetze sind hierbei nicht modelliert. Bei einem mittleren Rohrdurchmesser  $r_m$  von 28,5 mm und 100 m Rohrlänge in jeweils 3 Lagen mit idealerweise vollständigem Kontakt zum Material, ergibt sich eine Fläche für die Wärmeübertragung  $53,7\text{ m}^2$ . Eine Modellierung der WÜ-Fläche in Korrelation mit der Schichthöhe  $h_{u..o}$  wäre auch hier wünschenswert.

Die Wärmeleitfähigkeiten der in der vorliegenden Arbeit verwendeten Materialien sind:

- Substrat: 0,20 - 0,30 W/m \* K aus Abschnitt 6.2.2
- WÜ aus PE: 0,3 - 0,57 W/m \* K (dichteabhängig) [109]
- Wasser: 0,5562 W/m \* K

Im Vergleich wird deutlich, dass die für die Wärmeübertragung leistungs- bzw. geschwindigkeitbestimmende Größe die Wärmeleitung im Substrat zum WÜ ist, sofern in der Nähe der WÜ vor allem Wärmeleitung stattfindet, wie aufgrund der Aufbauweise der in dieser Arbeit untersuchten Biomeiler anzunehmen ist. Weiterhin ist die Veränderung des Wärmeübergangs aufgrund Vernässung am WÜ und Abbaugrad bisher nicht untersucht. Die Möglichkeit zur Modellierung verschiedener Materialien des WÜ ist für ein realistisches Modell empfehlenswert.



Abbildung 6.15: Vereinfachte Modell-Darstellung des vertikalen Profils,  $t_V = 30$  d

# 7 Bewertung und Diskussion

In der vorliegenden Arbeit konnte eine erste systematische Untersuchung des Betriebsverhaltens von Biomeilern durchgeführt werden. Das Messkonzept war geeignet, um typische Effekte besonders hinsichtlich der horizontalen und vertikalen Profilausprägung im Festbettreaktor und prozessbestimmender Einflussgrößen aufzudecken. Dabei können theoretische Annahmen zur Belüftung und zur Reaktionswärme bestätigt werden. Empirische Erfahrungswerte und Literaturwerte zur Wärmeleistung von ähnlichen Anlagen sind vergleichbar. Dies ermöglicht es, fundierte Hinweise zur Verbesserung des Versuchsaufbaus und des messtechnischen Konzepts für weitere Untersuchungen zu geben.

## **Bewertung des Versuchsaufbaus und messtechnischen Konzepts**

Es war im Rahmen der Versuche nicht möglich ein vollständiges Bild von der potentiellen Wärmeleistung der Biomeiler zu bekommen. Wie bereits ausführlich in Abschnitt 6.5.3 beschrieben, ist aufgrund der nicht einheitlichen Randbedingungen (Rücklauftemperatur, Volumenstrom) ein Vergleich der Biomeiler bezüglich ihres Leistungsprofils nur grob möglich. Weiterhin war es im Versuch nicht möglich, den Wärmeentzug systematisch zu variieren. Deswegen sind nur erste Vermutungen bezüglich der optimalen Betriebsweise, Prozess- und Leistungssicherheit ableitbar (siehe Abschnitt 6.5.4). Die erheblichen Ausfallzeiten von Pumpen und Sensoren erschweren zusätzlich die Auswertung der Daten (vgl. Abschnitt 5.1.2.3).

Wie in Abschnitt 6.5.4.2 nachgewiesen, ist der Versuchsaufbau nicht geeignet, um Aussagen über den Einfluss der Umgebungsbedingungen zu treffen. Im Folgenden werden Faktoren identifiziert, welche Aspekte der Aussagekraft einschränken, die für die Gewinnung weiterer Erkenntnisse aus diesem Versuch erforderlich gewesen wären.

## **Versuchsaufbau**

- Datendichte: 3 von 9 Heizkreisläufen versagen im Versuchszeitraum (Leck, Pumpe)
- Vergleichbarkeit: Keine einheitlichen Rücklauftemperaturen und Volumenströme
- Vergleichbarkeit: Keine einheitliche Aufbauweise und Wässerung
- Vergleichbarkeit: Position der WÜ im Verhältnis zur Biomeilerhöhe variiert
- Stichhaltigkeit: Keine ausreichende Senke im Heizkreislauf
- Stichhaltigkeit: Keine einheitliche Selbsterhitzungsphase nach dem Aufbau  $> 10$  Tage
- Stichhaltigkeit: Schredder für definierte Korngrößen nicht geeignet

### Messtechnisches Konzept

- Datendichte: nur 25 % der Versuchszeit sind bei 10 Biomeilern sowohl Volumenstrom-Sensoren als auch Pumpen aktiv
- Datendichte: Temperatursensoren liefern erst nach 35 Versuchstagen Messdaten
- Prägnanz: Position der Temperatursensoren im Abstand zum WÜ undefiniert (5-15 cm)
- Stichhaltigkeit: Probenahme des Substrats an zwei von 10 Tagen Aufbauzeit
- Stichhaltigkeit: Elementaranalyse der Proben nach 3 Monaten

Die Auswertung der Messwerte zeigt, dass eine Platzierung von vier Temperatursensoren im selben Abstand zur Reaktorgrenze und dem Wärmeübertrager in jeder Schichthöhe zur Beschreibung der Prozesse im Biomeiler nicht notwendig sind. Mit Kenntnis der örtlichen Witterungsbedingungen und der Prozesse im Biomeiler sind 3 Sensoren an einer Messstelle ausreichend. Für das Verständnis der Prozesse im Biomeiler hinsichtlich der Interaktion von Wärmeentzug und Reaktionswärme sind zusätzliche Sensoren in horizontalen und vertikalen Abstand zum WÜ empfehlenswert.

Entsprechend der genannten Einschränkungen wären bei weiterführenden Versuchen die Aussagen zur Rotationssymmetrie der Messwerte, zur Ausbildung der Randzone und zum Einfluss der Witterung nochmals zu überprüfen.

### Diskussion zur Relevanz

Aufgrund der geringen Wärmeleistungen im Vergleich zu anderen Verfahren (vgl. Abschnitt 4.2 und 4.3.3) und der Methanbildung (Abschnitt 6.4) muss eine weiterführende Untersuchung begründet sein. Folgende Motive können identifiziert werden:

Es existiert **bisher keine energiestoffliche Verwertung** für Abfälle der Klasse 2002 SN 91701 [110]. Jährlich fallen in Städten und Gemeinden große Mengen Grün- und Strauchschnitt an. Während in Biogasanlagen eher strukturarmes Material bevorzugt wird und in Verbrennungsanlagen nur trockenes Material rationell verwendet werden kann, ergibt sich keine optimale Nutzbarmachung dieser Biomasse in den bisherigen stofflichen und energetischen Verwertungskreisläufen [111]. Der Biomeiler ist somit eine Nischentechnologie ohne Konkurrenzanwendungen und eine energetische Nutzbarmachung von reinem Grünschnitt wäre auch im Niedertemperatur-Bereich wünschenswert (Kosteneffizienz vorausgesetzt).

Durch **Veränderung des Versuchsaufbaus** mit gezielter Belüftung könnte sowohl das Temperaturniveau angehoben, als auch eine Methanbildung verhindert werden. Eine gleichmäßige Belüftung des Biomeilers fördert aerobe Verhältnisse und ein damit verbundenes höheres Temperaturniveau. Vermutlich könnte dadurch mehr Wärmeenergie entzogen werden. Da in der Reaktorgrenze des Biomeilers kein Methan nachweisbar ist, wird davon ausgegangen, dass kein Methan emittiert wird. Dies müsste dennoch nachgewiesen werden. Inwieweit eine thermophile Methanoxidation im Biomeiler wünschenswert, sicher und steuerbar ist, wäre zu überprüfen.

**Vorschlag zur Erweiterung des Versuchs**

Eine Untersuchung von Biomeilern auf Modellebene ist für den weiterführenden Erkenntnisgewinn kaum geeignet. Zwar wird in dieser Arbeit eine Modellerweiterung vorgeschlagen, jedoch ist es nicht gerechtfertigt ein so komplexes und in Hinblick auf das Grundlagenwissen nicht optimiertes System theoretisch zu beschreiben. Für eine weitere Untersuchung des Betriebsverhaltens wird eine Erweiterung des Versuchsaufbaus vorgeschlagen, siehe Abb. 7.1.

**Versuchsaufbau** Für die Vergleichbarkeit der Biomeiler wird eine Parallelschaltung der Biomeiler mit Bypass und Volumenstromregelung empfohlen. Durch diesen Aufbau wäre eine Untersuchung des optimalen Betriebsverhaltens (Volumenstrom, Rücklauftemperatur, Temperaturniveau) möglich. Für die Untersuchung des Temperaturfelds und dessen zeitliche Änderung wäre eine Anordnung der Temperatursensoren im Abstand von 0,2 - 0,3 m im vertikalen Halbsseitenprofil empfehlenswert. Die Verwendung eines Wärmemengenzählers ist gegenüber einzelner Sensoren zu bevorzugen.

**Biomeileraufbau** Das Volumen der Biomeiler sollte bei einer Versuchszeit von 140 Tagen mindestens 35 m<sup>3</sup> betragen. Die Verwendung einer Belüftung unterstützt das Ausbilden eines gleichmäßigen Temperaturfelds im Biomeiler. Aufgrund der flexiblen Steuerungsmöglichkeiten wäre für die Belüftung besonders der Einsatz des Dombelüftungsverfahrens und die Abdeckung mit gereiftem Kompost empfehlenswert (siehe Abschnitt 3.5). Ebenfalls sollten das Design der Wärmeübertrager und die Form der BM sich an dem praxisnahen Betriebsablauf orientieren. Möglichkeiten hierfür sind statische WÜ (z.B. Betoneinbauten) oder Flächen-WÜ in einem zu untersuchenden optimalen Abstand. Ebenfalls könnte die BM-Form durch eine Trapezmiete abgelöst werden, sofern der Platz zur Verfügung steht.

**Steuerung** Die Steuerung des Wärmeentzugs der Biomeiler sollte sich am Temperaturniveau derselben orientieren. Hierfür wäre zusätzlich ein Regelkreis mit BM-Kerntemperatur-Abfrage und Pufferspeicher möglich (zu Abb. 7.1 (blau)). Der Wärmeentzug beginnt nach dem Erreichen der maximalen Temperatur. Die max. Temperatur ist substratspezifisch und kann durch einen Selbsterhitzungsversuch im Dewar-Gefäß bestimmt werden. Zur Erhöhung des Temperaturniveaus kann eine Stickstoffquelle (z.B. Festmist) in das Substrat eingebracht werden.

**Aufbauqualität** Für den Versuchsaufbau ist bezüglich der Aufbauqualität (Lage der WÜ und Sensorrohre, Wassergehalt) und des Heizsystems auf Zuverlässigkeit zu achten. Im Rahmen der Untersuchungen muss eine Vergleichbarkeit durch den Ausschluss möglichst vieler zufälliger Einflussgrößen erfolgen. Wird auf Basis der gewonnen Erkenntnisse eine marktreife Technologie gestaltet, müssen zufällige Fehler einkalkuliert werden, um trotzdem einen gewinnbringenden Wärmeentzug zu garantieren. Ist der gewinnbringende Wärmeentzug aufgrund kalkulierbarer Fehler nicht möglich, kann der Einsatz der Biomeiler-Technologie nur durch Fachpersonal gewährleistet werden.

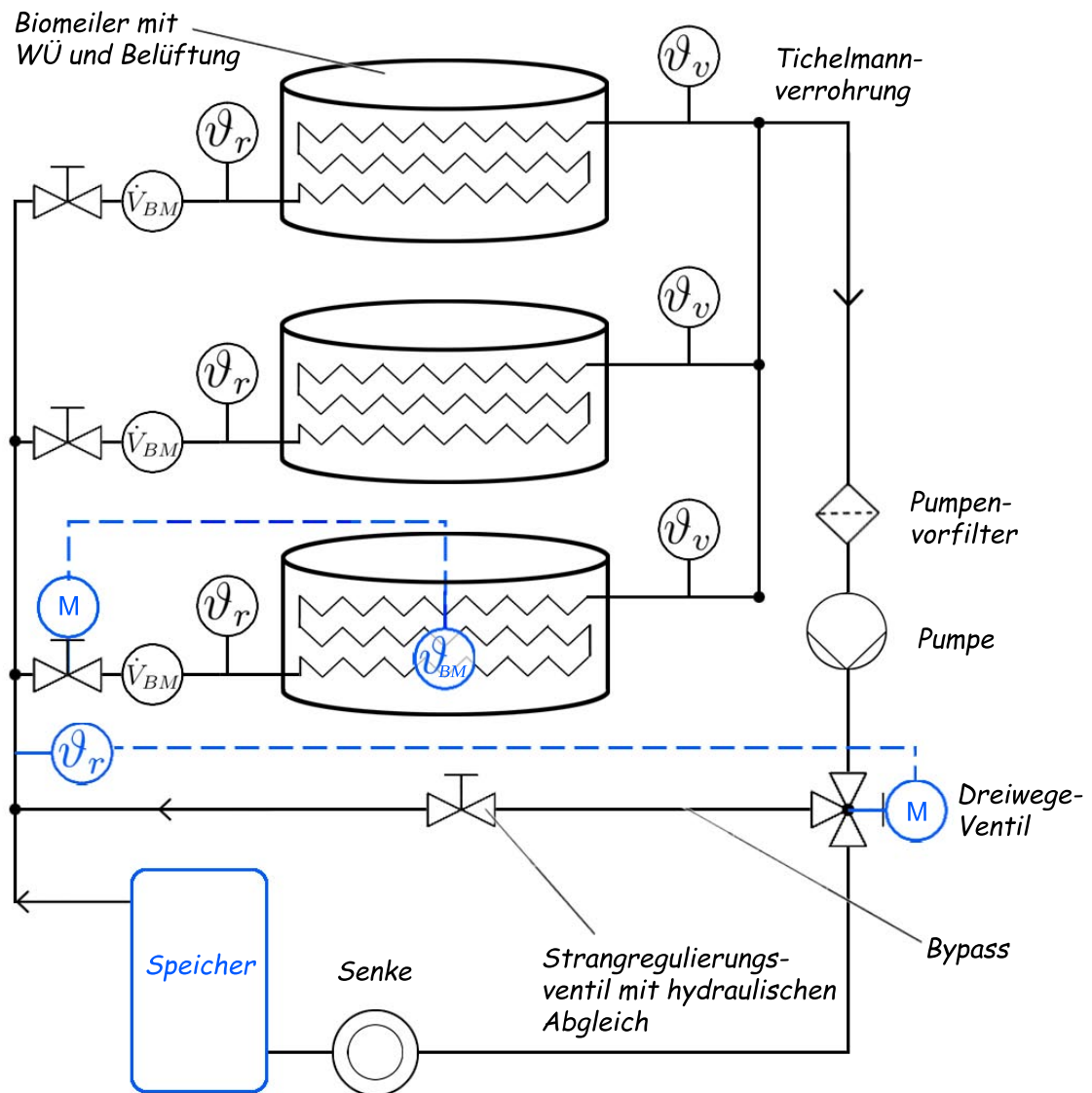


Abbildung 7.1: Vorschlag für einen optimierten Versuchsaufbau mit automatisierter BM-Kerntemperatur-Regelung und Speicher (blau angedeutet)

## 8 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit ist die erste empirische Studie zum Betriebsverhalten von unbelüfteten Festbettreaktoren mit Wärmeentzug, sog. Biomeilern. Es werden vier Biomeiler systematisch und mehrschichtig hinsichtlich der biochemischen Abbauprozesse untersucht. Zusätzlich werden die Daten von 130 Temperatursensoren über einen Zeitraum von 140 Versuchstagen für eine energetische Bewertung herangezogen. Dadurch können theoretische Annahmen bestätigt, thermodynamisch-biochemische Zusammenhänge aufgedeckt und beschrieben werden.

Die Untersuchung der horizontalen Messwertverteilung ergibt eine rotationssymmetrische Profilbildung der Biomeiler mit zylindrischer Reaktorform. Somit können die Messwerte einer Messstelle einen gesamten Biomeiler in diesem Versuch ausreichend beschreiben. Zur Untersuchung der vertikalen Profilausprägung werden die Messwerte der Korngröße, der Temperatur und der Gaskonzentrationen (Sauerstoff, Kohlenstoffdioxid und Methan) ausgewertet und bildlich dargestellt. Dabei zeigt sich eine Unterteilung des Festbettreaktors in Abhängigkeit vom Abstand zur Reaktorgrenzschicht in: Randzone ( $s \leq 0,5 \text{ m}$ ), Mittelzone ( $0,5 \text{ m} < s \leq 1,5 \text{ m}$ ) und Kernzone ( $s > 1,5 \text{ m}$ ). Die Kernzone ist durch stark anaerobe Verhältnisse geprägt, was eine hohe Methan- und Kohlenstoffdioxidkonzentration und eine geringe Reaktionswärme beinhaltet. Die Gase des anaeroben Abbaus werden durch den Kamineffekt besonders in der Versuchszeit bis 60 Tage auch in die Randzone der Deckschicht transportiert. Die Belüftung der Biomeiler geschieht ausschließlich über die Reaktoroberfläche und ist abhängig von der Schüttdichte. Im Vergleich der Biomeiler fällt auf, dass sie in ihrer Gaszusammensetzung ähnlich sind, trotz unterschiedlicher Temperaturniveaus. Deswegen sind Biomeiler mit demselben Volumen bis zu einem Wärmeentzug von ca. 2 kW bezüglich der biochemischen Abbauprozesse vergleichbar. In Verbindung mit dem abnehmenden Wassergehalt der Randzone nimmt die Belüftung im Zeitverlauf zu und weitet sich in die Mittelzone aus. Der Abbaugrad ist ebenfalls am höchsten in der Randzone. Die höchsten Temperaturen sind im Übergang von der Randzone zur Mittelzone nachweisbar. Dort besteht ein Optimum aus hoher Reaktionswärme aufgrund der Belüftung und des Wassergehalts und geringen Wärmeverlusten durch Konvektion und Wärmeleitung. Diese Erkenntnisse werden vereinfacht und für die Erweiterung eines Modells formuliert.

Die Untersuchungen zum Substrat zeigen ein günstiges Substratgemisch im Sinne des Grundlagenwissens zur Kompostierung. Das in den Versuchen verwendete Substrat befindet sich bereits im fortgeschrittenen Zersetzungsprozess. Dennoch wird bei Biomeilern ohne Wärmeentzug nach ca. 30 Tagen eine Temperatur von 67 °C erreicht. Biomeiler mit Wärmeentzug besitzen ein nied-

rigeres Temperaturniveau von 45 - 50 °C. Dabei können Unterschiede je nach Biomeiler-Größe identifiziert werden: Biomeiler mit geringerem Volumen können zu Versuchsbeginn dieselbe substratspezifische Wärmeleistung erbringen wie Biomeiler mit größerem Volumen, allerdings fällt die Wärmeleistung im Zeitverlauf bei kleineren Biomeilern stärker ab. Die Ursachen liegen v.a. im Oberflächen-Volumen-Verhältnis und der Wärmekapazität der Festbettreaktoren. Die maximal abgreifbare Wärmeleistung in den Versuchen liegt bei ca. 5 kW über einen Zeitraum von ca. 60 Tagen bei 12 Stunden Wärmeentzug am Tag. Diese Werte sind mit den publizierten Höchstwerten für die Wärmeleistung vergleichbar. Es ist sehr wahrscheinlich, dass im Rahmen des Kunstprojektes die Biomeiler nicht optimal aufgebaut und betrieben wurden.

Die aus den Grundlagen der Kompostierung abgeleiteten Annahmen zur Wärmeentwicklung und die Erfahrungswerte von Experten können als Arbeitshypothesen genutzt werden. Die Ansätze zur Modellierung des Kompostierungsprozesses sind hingegen für das Betriebsverhalten ohne zusätzliche Erkenntnis. Aufgrund der Komplexität der Prozesse und der existierenden Modellierungen ohne interne Wärmeübertrager können keine neuen Voraussagen für unbelüftete Festbettreaktoren mit Rohrschleifen-Wärmeübertragern aus den Modellierungen abgeleitet werden. Vergleiche mit Technologien zum Wärmeentzug aus dem aeroben Abbau von Biomasse zeigen eine Konzentration der Veröffentlichungen auf den Bereich der Short-Batch Verfahren. Diese Verfahren mit zwangsbelüfteten Reaktoren nutzen v.a. die thermophile Phase des Kompostierungsprozesses von max. einem Monat. Die Biomeiler-Technologie verwendet hingegen passive Belüftungssysteme und nutzt die Wärmeleistung über einen Zeitraum von mehr als sechs Monaten.

Die Identifikation der Einflussfaktoren zeigt, dass der Wärmeentzug der prozessbestimmende Parameter ist. Die höchsten Wärmeleistungen werden bei einem Volumenstrom von 8 L/min, einem Temperaturniveau der Biomeiler (mittlere Schicht) bei > 45 °C und bei einer Temperaturdifferenz von Rücklauf zu Biomeiler (mittlere Schicht) von 14 K erreicht. Einen überraschend großen Einfluss hat die Aufbauqualität auf das Betriebsverhalten, da sie direkte Auswirkung auf die Zuverlässigkeit des Wärmeentzugs und die Prozessparameter (z.B. Wassergehalt) besitzt. Es wird angenommen, dass es neben der optimalen Betriebsweise auch eine optimale Aufbauweise bezüglich der Gesamtgröße des Reaktors und dem Abstand der Wärmeübertrager gibt.

Die gewonnenen Erkenntnisse ermöglichen es, fundierte Hinweise zur Verbesserung des Versuchsaufbaus und des messtechnischen Konzepts für weitere Untersuchungen zu geben. Besonders sind die Verwendung einer Belüftung für den Biomeiler und die Umgestaltung der Festbettreaktoren und Wärmeübertrager im Sinne eines praxisnahen Betriebsablaufs zu berücksichtigen. Die Veränderungen des Heizkreislaufs und der Sensorenanordnung dienen der Steuerungserweiterung für die Rücklauftemperaturen und für den Durchfluss der Wärmeübertrager, damit quantitative Aussagen für eine optimale Betriebsweise klarer umrissen werden können.

## 9 Ausblick

Die Untersuchungen in dieser Arbeit dienen dem Verständnis der komplexen Interaktionen im Kompostierungsprozess und dessen Einflussgrößen. Die Erkenntnisse bezüglich des räumlichen Temperaturprofils im Biomeiler und der Belüftung können auch für die Prozesssteuerung von kommunalen Kompostmieten verwendet werden.

Die Erkenntnisse zu den komplexen, biochemischen Abbauvorgängen sind für die Entwicklung von Technologien mit biogenen Substraten eine notwendige Grundlage. Es wäre zu prüfen, ob eine optimale Betriebsweise eines unbelüfteten Biomeilers konkurrenzfähig mit einer belüfteten, substratoptimierten Variante wäre. Eine Technologieoptimierung würde eine Zielmatrix beinhalten, welche abhängig von den Nutzerzielen die notwendige Prozessführung aufzeigt. Hierfür ist es notwendig, weitere Untersuchungen hinsichtlich des optimalen Aufbaus (z.B. Wärmeübertrager) durchzuführen und das thermodynamische Verhalten der Biomeiler mit Hilfe einer Versuchsmatrix (z.B. Rücklaufftemperaturen, Volumenströme) zu analysieren.

Die getroffenen qualitativen Aussagen in dieser Arbeit sind von Nutzen als Grundlage für die Weiterentwicklung von Modellen des Kompostierungsprozesses bezüglich der räumlich-diskreten Verteilung von Zustandsgrößen und der Modellierung des Wärmeentzugs. Unabhängig von den in dieser Arbeit relevanten Fragestellungen sind die gewonnenen Daten geeignet, um eine Validierung von vorhandenen Modellen durchzuführen.

Mögliche Anwendungen der Nutzergruppen für eine dezentrale, kosteneffiziente Technologie gibt es viele: Von der Deckung der Heizgrundlast (mit Pufferspeicher) für Wohnungen, Ställe und Hallen im Niedertemperaturbereich (z.B. Fußbodenheizung) bis zur Erwärmung von Brauch- und Trinkwasser in Kombination mit z.B. Spitzenlastkessel oder Wärmepumpe. Auch die Nutzung der aus der Kompostierung gewonnenen Wärme für Biogasanlagen oder Kläranlagen direkt vor Ort kann vorteilhaft im Sinne eines effizienten Energie- und Stoffstrommanagements sein. Fragestellungen zu den gesetzlichen Rahmenbedingungen und zu hygienischen Aspekten im Umgang mit den spezifischen Abfallstoffen müssten dafür geklärt werden.

Die Anzahl der Veröffentlichungen und akademischen Projekte im Bereich des Wärmeentzugs aus dem aeroben Abbau von Biomasse zeigen, wie relevant das Thema im Bereich der energetischen Nutzung von Reststoffen zum jetzigen Zeitpunkt ist. Inwieweit die Biomeiler-Technologie kosteneffizient und konkurrenzfähig auf diesem Feld agieren kann, bleibt offen.



# Literatur

- [1] Pain, J. & Pain, I.: Another Kind of Garden - The Methods of Jean Pain. Villecroze, 1972.
- [2] Thostrup, P.: Preliminary paper on continuous thermophilic composting heat plant for solid manure. In: Seminar on Composting of Organic Wastes. Jutland Technological Institut, Aarhus, Dänemark, 1982, S. 63–86.
- [3] Schuchardt, F.: Versuche zum Wärmeentzug aus Festmist. In: Landbauforschung Völkenrode 33.3 (1983), S. 169–178.
- [4] Schuchardt, F.: Wärmeentzug bei der Kompostierung von Schnittholz. In: Landbauforschung Völkenrode 34.4 (1984), S. 189–195.
- [5] Soyez, K. & Koller, M.: Verfahrensentwicklung zur Kopplung von Kompostierung und Gewächshausproduktion - BMBF-Verbundvorhaben „Neue Techniken zur Kompostierung“ Teilvorhaben TV3/1-3. Techn. Ber. Umweltbundesamt, 1996.
- [6] Viel, M. et al.: Optimization of In-vessel Co-composting through heat recovery. In: Biological Wastes 20.3 (1987-01), S. 167–185.
- [7] Fulford, B.: The Composting Greenhouse at New Alchemy Institute: A Report on Two Years of Operation and Monitoring March 1984-January 1986. Techn. Ber. New Alchemy Institute, 1986.
- [8] Sobel, A. T. & Muck, R. E.: Energy in animal manures. In: Energy in agriculture 2 (1983), S. 161–176.
- [9] Brown, G.: The Compost-Powered Water Heater - How to heat your greenhouse, pool, or buildings with only compost! English. Vermont, 2014-05.
- [10] Smith, M. M., Aber, J. D. & Rynk, R.: Heat Recovery from Composting: A Comprehensive Review of System Design, Recovery Rate, and Utilization. In: Compost Science & Utilization (2016-10), S. 1–12.
- [11] Müller, N.: “Wärmeentzug aus dem aeroben Abbau von Biomasse”. Großer Beleg. Dresden: Technische Universität Dresden, 2017-01.
- [12] Haug, R. T.: The practical handbook of compost engineering. Lewis Publ., 1993.
- [13] Zhao, R. et al.: Literature Review on Composting Heat Recovery. In: Edmonton, Alberta: The Canadian Society for Bioengineering, 2015, S. 12.
- [14] Epstein, E.: The Science of Composting. Canton, Massachusetts: CRC Press, 1997.

- 
- [15] Epstein, E.: Industrial composting / environmental engineering and facilities management. CRC Press Inc, 2011.
  - [16] Linzner, R. et al.: Klimarelevanz der Kompostierung unter Berücksichtigung der Verfahrenstechnik und Kompostanwendung (KliKo) - Endbericht im Auftrag der MA 48. Techn. Ber. Wien: Universität für Bodenkultur, 2005.
  - [17] Raclavská, H. et al.: Conditions for energy generation as an alternative approach to compost utilization. In: *Environmental technology* 32.4 (2011), S. 407–417.
  - [18] Schroeder, D. & Blum, W. E.: *Bodenkunde in Stichworten*. 5. Aufl. 1992.
  - [19] Biddlestone, A. J., Gray, K. R. & Day, C. A.: Composting and straw decomposition. In: *Environmental Biotechnology*. University of Birmingham. Department of Civil Engineering, 1987.
  - [20] Ryckeboer, J. et al.: A survey of bacteria and fungi occurring during composting and self-heating processes. In: *Annals of Microbiology* 53.4 (2003), S. 349–410.
  - [21] Adams, J. & Frostick, L.: Analysis of bacterial activity, biomass and diversity during windrow composting. In: *Waste Management* 29.2 (2009-02), S. 598–605.
  - [22] Kämpfer, P. & Weißenfels, W. D.: *Biologische Behandlung organischer Abfälle*. Berlin, Heidelberg, 2013-03.
  - [23] Stadtmüller, U.: *Grundlagen der Bioabfallwirtschaft - Lehr- und Handbuch*. Neuruppin: TK Verlag Thomé-Kozmiensky, 2004.
  - [24] Richard, T. L. et al.: Moisture Relationships in Composting Processes. In: *Compost Science & Utilization* 10.4 (2002-09), S. 286–302.
  - [25] Richard, T. L. et al.: Air-filled porosity and permeability relationships during solid-state fermentation. In: *Biotechnology progress* 20.5 (2004), S. 1372–1381.
  - [26] Brummack, J.: *Biologische Verfahren für die Abfallentsorgung. Vorlesungsunterlagen*. Dresden, 2017.
  - [27] Kranert, M. & Cord-Landwehr, K., Hrsg.: *Einführung in die Abfallwirtschaft*. 4. Aufl. Studium. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2010.
  - [28] Bundeskanzleramt: *Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über Qualitätsanforderungen an Komposte aus Abfällen (Kompostverordnung), Fassung vom 22.03.2016*. 2001.
  - [29] Barrington, S. et al.: Compost convective airflow under passive aeration. In: *Bioresource technology* 86.3 (2003), S. 259–266.
  - [30] Paar, S.: „Das Dombelüftungsverfahren - Ein Verfahren zur Belüftung offener Rottenmieten unter Nutzung des thermischen Auftriebs“. Diss. Dresden: TU Dresden, 2000.
  - [31] Rasapoor, M. et al.: The effects of aeration rate on generated compost quality, using aerated static pile method. In: *Waste Management* 29.2 (2009-02), S. 570–573.

- [32] Gao, M. et al.: The effect of aeration rate on forced-aeration composting of chicken manure and sawdust. en. In: *Bioresource Technology* 101.6 (2010-03), S. 1899–1903.
- [33] Solano, M. L. et al.: Performance characteristics of three aeration systems in the composting of sheep manure and straw. In: *Journal of Agricultural Engineering Research* 79.3 (2001-07), S. 317–329.
- [34] Sartaj, M., Fernandes, L. & Patni, N. K.: Performance of forced, passive and natural aeration methods for composting manure slurries. en. In: *Transactions of the ASAE* 40.2 (1997), S. 457–463.
- [35] Spillmann, P. & Collins, H. J.: Das Kaminzug-Verfahren - Eine einfache und zielsichere Belüftung als Voraussetzung des aeroben Abbaues im Betrieb einer geordneten Mülldeponie. In: *Forum Städte-Hygiene*. Bd. 32. 1981, S. 15–24.
- [36] Ogunwande, G. A. & Osunade, J. A.: Passive aeration composting of chicken litter: Effects of aeration pipe orientation and perforation size on losses of compost elements. In: *Journal of Environmental Management* 92.1 (2011-01), S. 85–91.
- [37] Sylla, Y. B. et al.: Feasibility study of a passive aeration reactor equipped with vertical pipes for compost stabilization of cow manure. In: *Waste management & research* 24.5 (2006), S. 456–464.
- [38] Li, L. et al.: Field trial of a new aeration system for enhancing biodegradation in a biopile. In: *Waste Management* 24.2 (2004), S. 127–137.
- [39] Karnchanawong, S. & Suriyanon, N.: Household organic waste composting using bins with different types of passive aeration. In: *Resources, Conservation and Recycling* 55.5 (2011-03), S. 548–553.
- [40] Kaiser, J.: Modelling composting as a microbial ecosystem: a simulation approach. In: *Ecological Modelling* 91.1 (1996), S. 25–37.
- [41] Lin, Y. P. et al.: Modeling of substrate degradation and oxygen consumption in waste composting processes. In: *Waste Management* 28.8 (2008), S. 1375–1385.
- [42] Lashermes, G. et al.: Composting in small laboratory pilots: Performance and reproducibility. In: *Waste Management* 32.2 (2012), S. 271–277.
- [43] Deipser, A.: “Prozesssimulation biologischer Abbauprozesse im Bereich der Abfallwirtschaft”. Diss. Technische Universität Hamburg, 2014.
- [44] Scholwin, F.: *Durch Prozessregelung zum Rotteerfolg: ein modellbasiertes Regelungskonzept für biologische aerobe Abfallbehandlungsanlagen auf der Grundlage von Fuzzy Logic*. Rhombos-Verlag, 2005.
- [45] Walther, E. et al.: Heat recovery in compost piles for building applications. In: *Thermal Science* 21.2 (2017).

- [46] Zambra, C. E., Moraga, N. O. & Escudey, M.: Heat and mass transfer in unsaturated porous media: Moisture effects in compost piles self-heating. In: *International Journal of Heat and Mass Transfer* 54.13 (2011), S. 2801–2810.
- [47] Ahn, H. K., Richard, T. L. & Choi, H. L.: Mass and thermal balance during composting of a poultry manure—Wood shavings mixture at different aeration rates. In: *Process Biochemistry* 42.2 (2007), S. 215–223.
- [48] Hasan, K. M. M. et al.: Study on the quality and stability of compost through a Demo Compost Plant. In: *Waste management* 32.11 (2012), S. 2046–2055.
- [49] Mason, I. G.: Mathematical modelling of the composting process: A review. In: *Waste Management* 26.1 (2006), S. 3–21.
- [50] De Guardia, A. et al.: Characterization and modelling of the heat transfers in a pilot-scale reactor during composting under forced aeration. In: *Waste management* 32.6 (2012), S. 1091–1105.
- [51] Wang, Y. et al.: Estimating thermal balance during composting of swine manure and wheat straw: A simulation method. In: *International Journal of Heat and Mass Transfer* 75 (2014), S. 362–367.
- [52] Kranert, M.: “Freisetzung und Nutzung von thermischer Energie bei der Schlammkompostierung”. Diss. Bielefeld: Erich Schmidt, 1988.
- [53] Krischer, O. & Kast, W.: *Trocknungstechnik*, Vol. 1. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 1992.
- [54] Dach, J.: “Zur Deponiegas-und Temperaturentwicklung in Deponien mit Siedlungsabfällen nach mechanisch-biologischer Abfallbehandlung”. Diss. Technischen Universität Darmstadt, 1998.
- [55] Klejment, E. & Rosiński, M.: Testing of thermal properties of compost from municipal waste with a view to using it as a renewable, low temperature heat source. In: *Bioresource Technology* 99.18 (2008), S. 8850–8855.
- [56] Ahn, H. K. et al.: Determination of thermal properties of composting bulking materials. In: *Bioresource Technology* 100.17 (2009), S. 3974–3981.
- [57] Poincelot, R. P.: The biochemistry of composting process. In: *National Conference on Composting Municipal Residues and Sludges*. 1977.
- [58] Mason, I. G. & Milke, M. W.: Physical modelling of the composting environment: A review. Part 2: Simulation performance. In: *Waste Management* 25.5 (2005), S. 501–509.
- [59] Weppen, P.: Determining Compost Maturity: Evaluation Of Analytical Properties. In: *Compost Science & Utilization* 10.1 (2002-01), S. 6–15.
- [60] Nelson, M. I., Balakrishnan, E. & Chen, X. D.: A Semenov model of self-heating in compost piles. In: *Process Safety and Environmental Protection* 81.5 (2003), S. 375–383.

- [61] Mason, I. G.: Predicting biodegradable volatile solids degradation profiles in the composting process. In: *Waste management* 29.2 (2009), S. 559–569.
- [62] Sidhu, H. S., Nelson, M. I. & Chen, X. D.: A simple spatial model for self-heating compost piles. In: *ANZIAM Journal* 48 (2007), S. 135–150.
- [63] Bley, T. et al.: Describing microbial degradation processes with the EVOLON model. In: *Acta biotechnologica* 16.4 (1996), S. 237–244.
- [64] Sole-Mauri, F. et al.: An integrated biochemical and physical model for the composting process. In: *Bioresource technology* 98.17 (2007), S. 3278–3293.
- [65] Themelis, N. J. & Kim, Y. H.: Material and energy balances in a large-scale aerobic bioconversion cell. In: *Waste management & research* 20.3 (2002), S. 234–242.
- [66] Cooney, C. L., Wang, D. I. C. & Mateles, R. I.: Measurement of heat evolution and correlation with oxygen consumption during microbial growth. In: *Biotechnology and bioengineering* 11.3 (1969), S. 269–281.
- [67] Schuchardt, F. & Orth, H. W.: Entzug von Kompostierungswärme aus landwirtschaftlichen Abfallstoffen. In: *Landbauforschung Völkenrode* 28.3 (1978), 179 ff.
- [68] Themelis, N. J.: Control of heat generation during composting. In: *BioCycle* 46.1 (2005), S. 28–30.
- [69] Kaltschmitt, M., Hartmann, H. & Hofbauer, H., Hrsg.: *Energie aus Biomasse*. de. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009.
- [70] Guo, R. et al.: Effect of aeration rate, C/N ratio and moisture content on the stability and maturity of compost. In: *Bioresource Technology* 112 (2012-05), S. 171–178.
- [71] Irvine, G., Lamont, E. R. & Antizar-Ladislao, B.: Energy from waste: reuse of compost heat as a source of renewable energy. In: *International Journal of Chemical Engineering* (2010).
- [72] Arbeitsgemeinschaft Bioenergie: Möglichkeiten der Wärmerückgewinnung bei der Kompostierung: Untersuchung zuhanden von Kreisen der Abfallwirtschaft. Maschwanden: Bundesamt für Energiewirtschaft, 1993.
- [73] Xiao, Y. et al.: Continuous thermophilic composting (CTC) for rapid biodegradation and maturation of organic municipal solid waste. In: *Bioresource technology* 100.20 (2009), S. 4807–4813.
- [74] Diaz, L. F. et al.: Systems used in composting. In: *Waste Management Series* 8 (2007), S. 67–87.
- [75] Kasinski, S. & Wojnowska-Baryla, I.: Passive Aeration Allows Stabilization of Waste without Regulation of Moisture. In: *Compost Science & Utilization* 21.3-4 (2013), S. 147–155.

- [76] Lamprecht, I. & Schaarschmidt, B.: Adiabatische Kalorimetrie und alternative Energiegewinnung. In: *Thermochimica Acta* 40.1 (1980), S. 157–166.
- [77] Niese, G.: Über die Kompostierung von Siedlungsabfällen unter Berücksichtigung mikrobieller Gesichtspunkte. In: *Grundlagen der Landtechnik* 28.2 (1978).
- [78] Stoffella, P. J. & Kahn, B. A.: *Compost Utilization In Horticultural Cropping Systems*. CRC Press, 2001-01.
- [79] Nwanze, K. & Clark, G.: Optimizing Heat Extraction from Compost. In: Edmonton, Alberta, 2015.
- [80] Berthelsen, J.: Engineering problems with effluents from livestock. English. In: St. Catherine's College, Cambridge, United Kingdom: National Institute of Agricultural Engineering, 1978-09.
- [81] Jaccard, L. et al.: Yard Waste Composting with Heat Recovery. In: *Compost Science & Utilization* 1.3 (1993-06), S. 10–14.
- [82] Rogers, S.: *Extracting Heat from Compost*. Royal Military College Canada, 2006.
- [83] Tucker, M. F.: Extracting thermal energy from composting. In: *Biocycle* 47.8 (2006).
- [84] Smith, M. & Aber, J.: Heat Recovery from Compost. In: *BioCycle* 55.2 (2014), S. 26–29.
- [85] Chambers, D. P.: The design and development of heat extraction technologies for the utilisation of compost thermal energy. In: (2009).
- [86] Seki, H. & Komori, T.: Packed-column-type Heating Tower for Recovery of Heat Generated in Compost. In: *Journal of Agricultural Meteorology* 48.3 (1992), S. 237–246.
- [87] Steppa, M.: Two options for energy recovery from waste biomass. In: *Maszyny i Ciagniki Rolnicze* 3 (1988).
- [88] Vemmelund, N. & Berthelsen, L.: A note on heat recovery from mechanically aerated farm-yard manure. In: *Agricultural Wastes* 1.2 (1979), S. 157–160.
- [89] Di Maria, F. et al.: Energy Recovery from Low Temperature Heat Produced During Aerobic Biological Treatment. en. In: *Energy Procedia* 45 (2014), S. 81–90.
- [90] Di Maria, F., Benavoli, M. & Zoppitelli, M.: Thermodynamic analysis of the energy recovery from the aerobic bioconversion of solid urban waste organic fraction. In: *Waste management* 28.5 (2008), S. 805–812.
- [91] Kempkens, W.: High-Tech-Entsorgung von Grünabfällen Heizofen ohne Flamme. In: *Bio-Energie* 37 (1991), S. 68.
- [92] Vertral, Inc.: *Citypod Urban Composter - Working for Nature*. 2016-08.
- [93] Green Mountain Technologies: *Earth Flow Intermodal*. 2017-01.
- [94] Winship, E., Notton, D. & Holmes, D.: Combined heat and composting. In: University of Wageningen: European Compost Network ECN e.V., 2008-10.

- [95] Winship, E., Holms, D. & Notton, D.: Combined Heat And Composting. 2016-06.
- [96] Svikovsky, E.: The use of microbial thermal energy. In: Bioenergy Energie aus lebenden Systemen, Tagungsbericht Gottl. Duttweiler-Inst, Zürich (1978).
- [97] Chroni, C. et al.: Microbial characterization during composting of biowaste. In: Waste Management 29.5 (2009), S. 1520–1525.
- [98] Seki, H.: Exergy analysis and the dissipation function of the composting process. In: Journal of Agricultural Meteorology (Japan) 72 (1) (2016), S. 37–42.
- [99] Lekic, S.: Possibilities of Heat Recovery from Waste Composting Process. 2005.
- [100] Petiot, C. & Guardia, A. d.: Composting in a Laboratory Reactor: A Review. In: Compost Science & Utilization 12.1 (2004-01), S. 69–79.
- [101] Wang, Y. et al.: Using thermal balance model to determine optimal reactor volume and insulation material needed in a laboratory-scale composting reactor. In: Bioresource technology 206 (2016), S. 164–172.
- [102] Sardinsky, R.: Greenhouse CO<sub>2</sub> dynamics and composting in a solar heated bioshelter. In: Solar greenhouses, living and growing: proceedings of the second National Conference on Energy Conserving Solar Heated Greenhouses. Plymouth, Mass.: Brattleboro, Vt.: New England Solar Energy Assoc., 1979-04.
- [103] Winship, N.: Combined Heat & Aerobic Composting ‘ticks most boxes’. 2010-07.
- [104] Cuhls, H.: Wärme und Humus aus dem Biomeiler. 2013-11.
- [105] B+G Ingenieure: Kunstobjekt Paradiesgarten, Reformationsjubiläum 2017 e.V. Berlin, 2017-03.
- [106] SIKA Dr. Siebert & Kühn GmbH & Co.KG: Emissionsfaktoren. 2017.
- [107] Einstein, A.: Zur Methodik der theoretischen Physik, 1. 1930.
- [108] Khater, E.-S. G., Bahnasawy, A. H. & Ali, S. A.: Mathematical model of compost pile temperature prediction. In: Journal of Environmental & Analytical Toxicology 4.6 (2014), S. 1.
- [109] Czichos, H.: Die Grundlagen der Ingenieurwissenschaften. 31. Auflage. Springer, 2000.
- [110] Neubauer, C. & Kügler, I.: Vererdung von Abfällen: Vorarbeiten für eine rechtliche Regelung. 2005.
- [111] Hoffman, D. H. & Kern, D. M.: Weiterentwicklung der stofflichen und energetischen Verwertung von Biomasse beim Zweckverband regionale Abfallwirtschaft - Machbarkeitsstudie. Techn. Ber. Witzenhausen, 2011.

# Anhang



# A Daten

## A.1 Aufbau



Schichtung: 1. Substrat ca. 70 cm; 2. Sensorrohre für Temperaturmessung; 3. Wärmeübertrager (WÜ); 4. Substrat überdeckt WÜ; 5. Silonetz

Abbildung A.1: Aufbau der Biomeiler mit WÜ und Sensorrohren, Aufbauart II

## A.2 Rotationssymmetrie

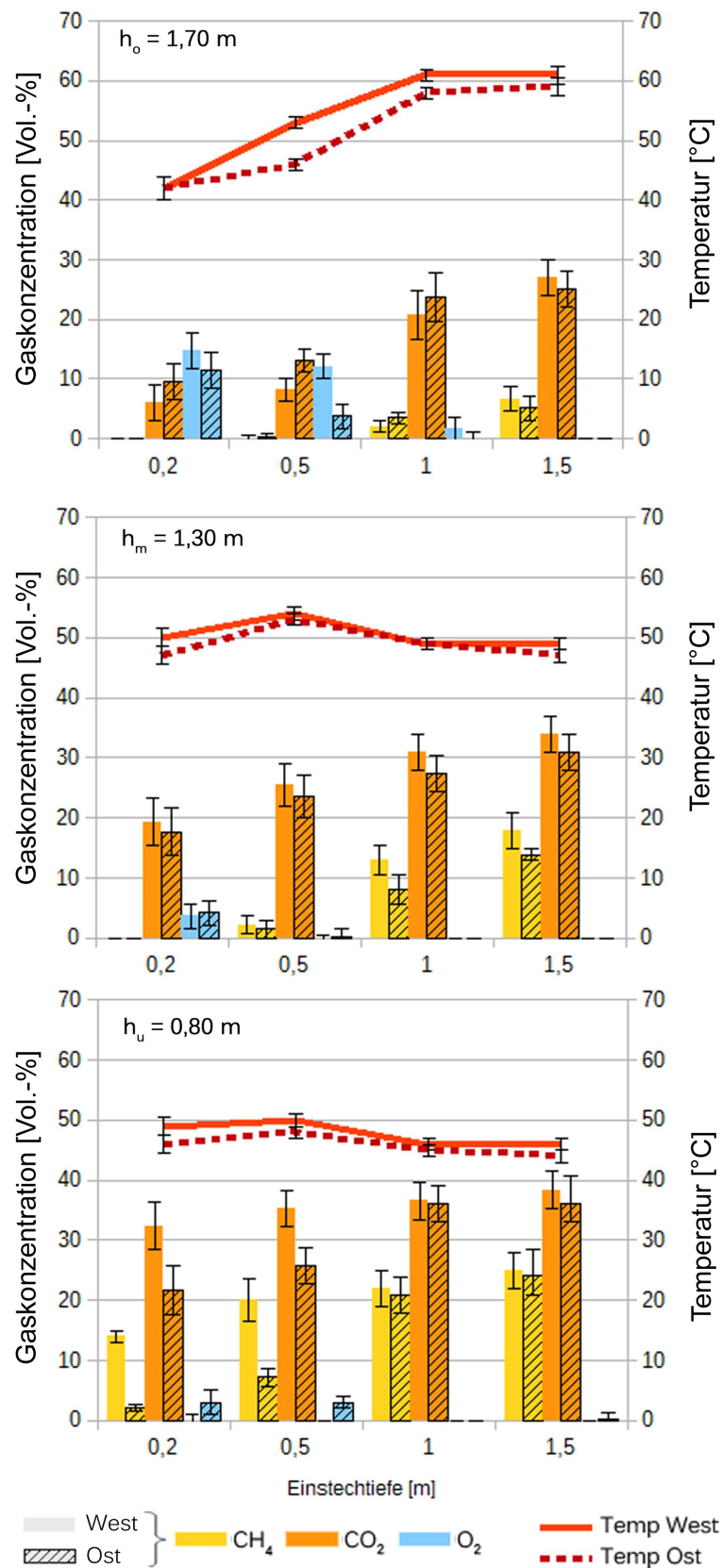


Abbildung A.2: Temperatur und Gaszusammensetzung im Seitenvergleich, BM 2B

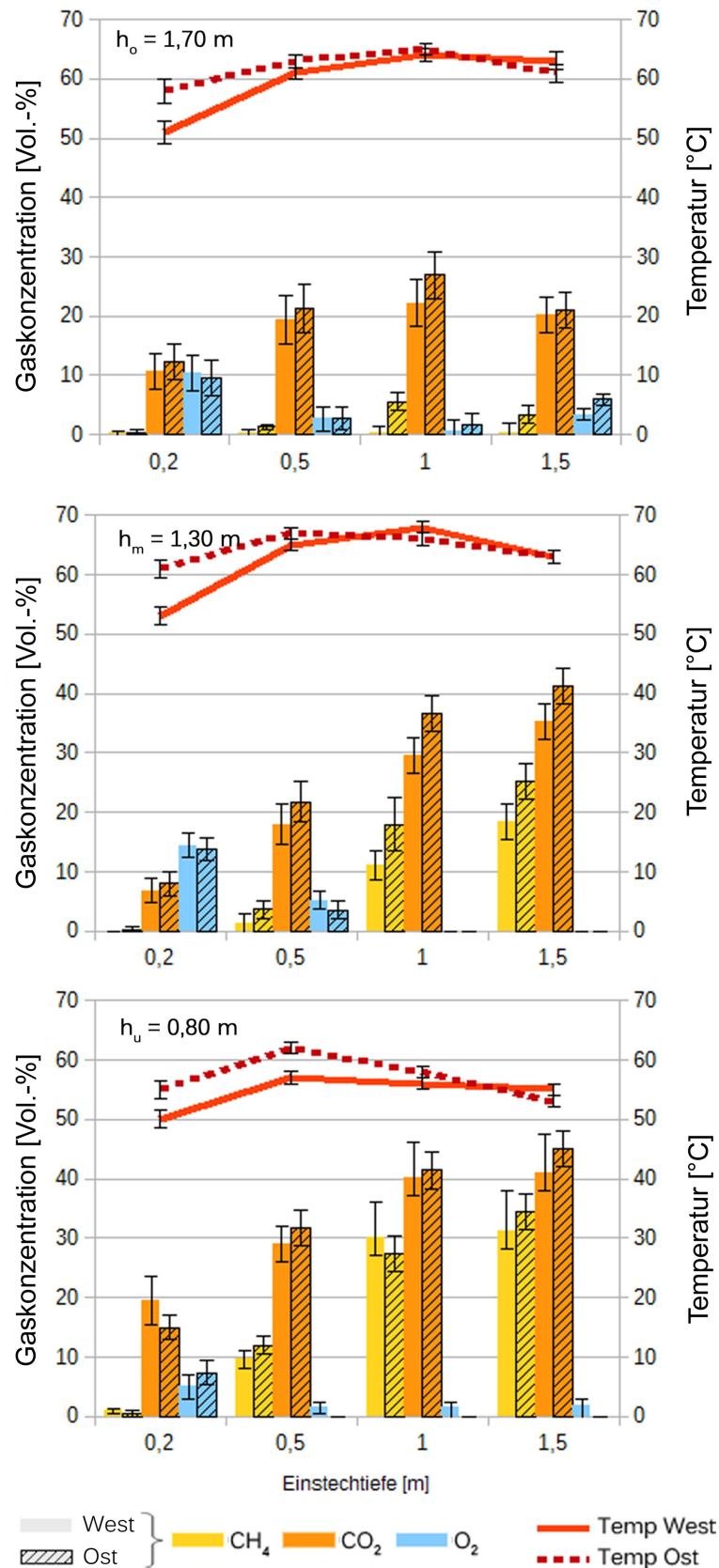


Abbildung A.3: Temperatur und Gaszusammensetzung im Seitenvergleich, BM 2C



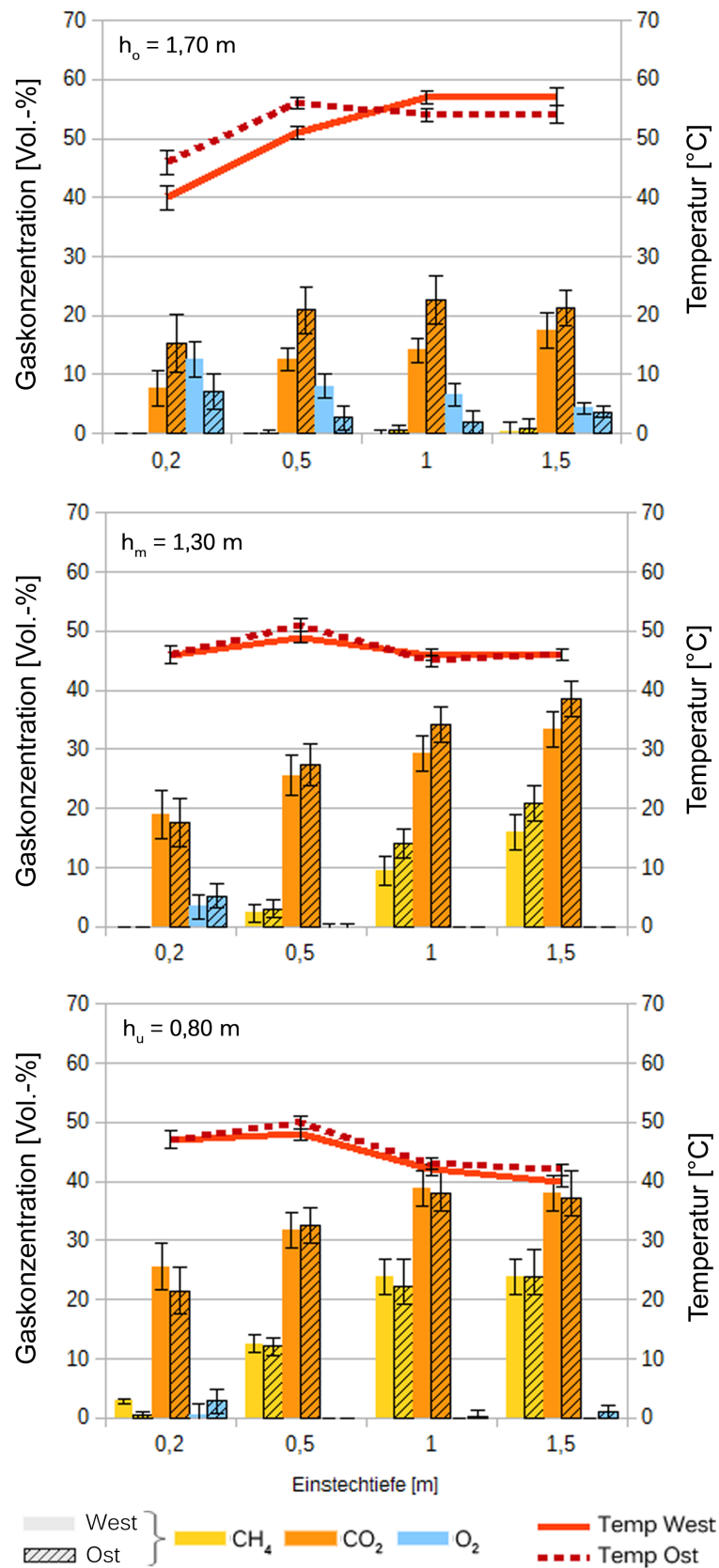


Abbildung A.4: Temperatur und Gaszusammensetzung im Seitenvergleich, BM 2D

### A.3 Vertikales Profil des Abbaugrads

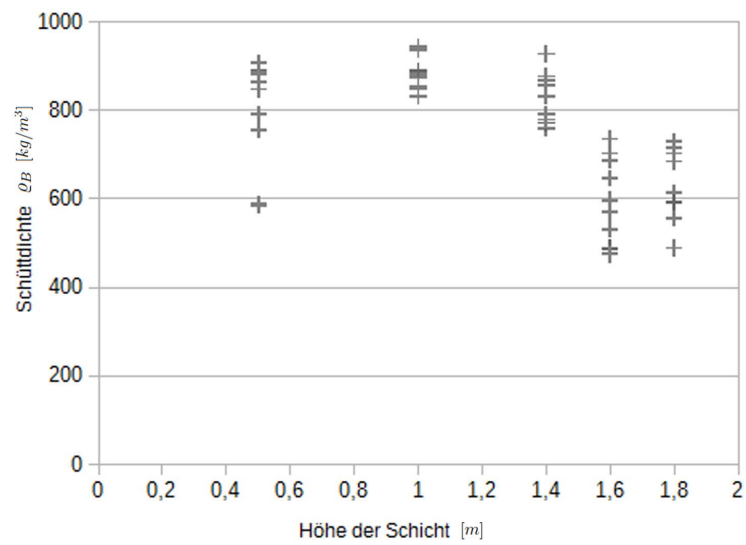


Abbildung A.5: Schüttdichte  $\rho_{BM}$  abh. von der Schichthöhe  $h_{u..o}$ , Probenahme Produkt

## A.4 Vertikales Profil der Gaskonzumensetzung

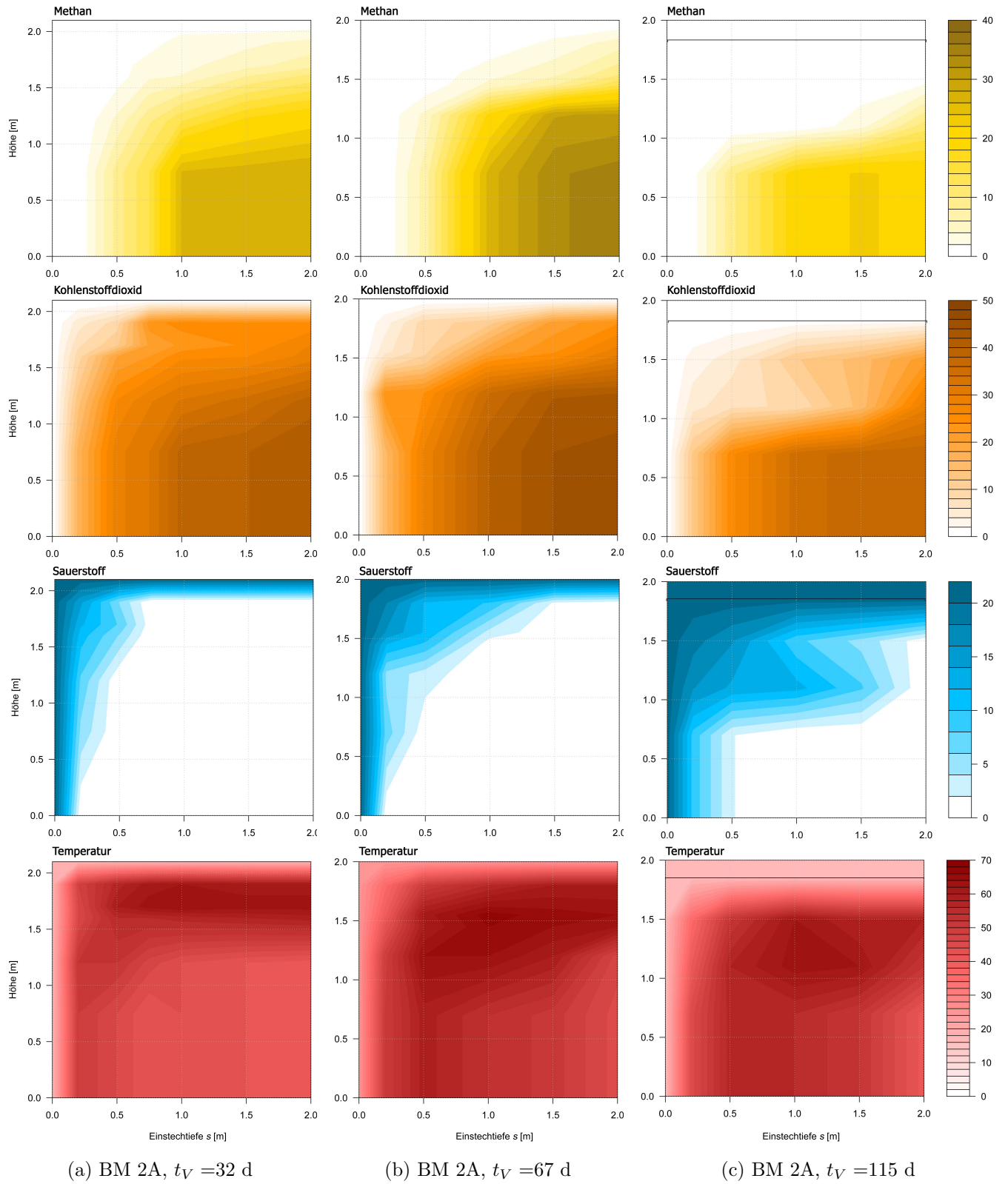
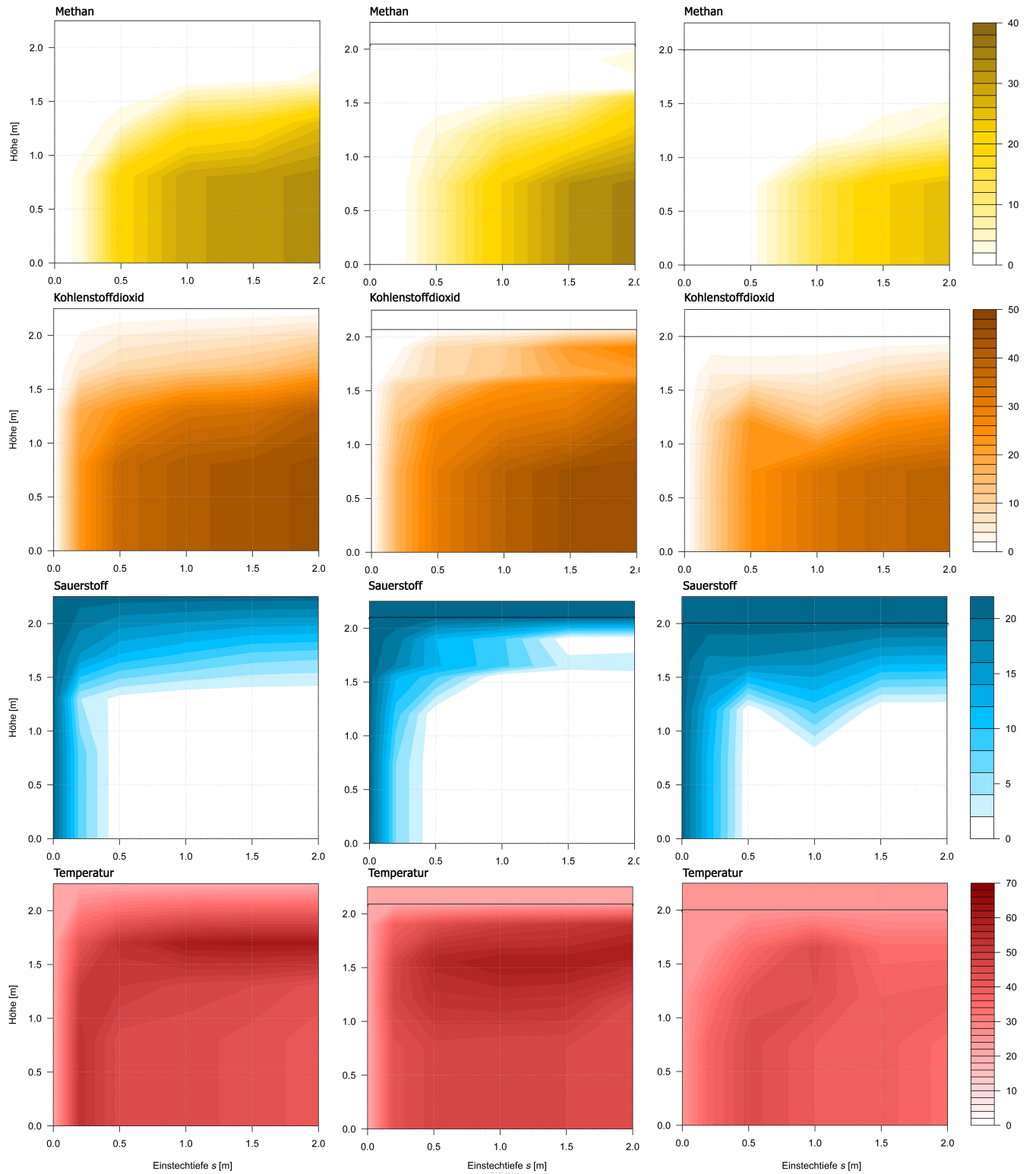


Abbildung A.6: Profil der Gaskonzentrationen  $G$  [%] und der Temperatur  $\vartheta$  [°C] im Zeitverlauf, 50 Tage Wärmeentzug, BM 2A


(a) BM 2D,  $t_V = 46$  d

(b) BM 2D,  $t_V = 67$  d

(c) BM 2D,  $t_V = 115$  d

Abbildung A.7: Profil der Gaskonzentrationen  $G$  [%] und der Temperatur  $\vartheta$  [°C] im Zeitverlauf mit Wärmeentzug, BM 2D

## A.5 Oberflächentemperatur

Tabelle A.1: Vergleich Oberflächentemperatur: BM Gr. 2

Versuchszeit		Biomeiler (Deckfläche)				Biomeiler (Mantelfläche)			
Tag	Uhrzeit	2A	2B	2C	2D	2A	2B	2C	2D
102	20:30	23,0	19,6	20,7	19,6	23,5	NA	NA	22,5
103	05:30	NA	NA	NA	NA	17,6	16,6	16,7	18,7
116	21:00	NA	NA	NA	NA	18,3	17,9	19,2	19,6

Tabelle A.2: Vergleich Oberflächentemperatur: Morgen und Abend

Versuchszeit		Umgebungstemp.	Perspektiven		
Tag	Uhrzeit	[ °C]	1	2	3
102	20:30	19,0	22,0	22,3	21,0
103	05:30	14,8	17,0	16,8	16,7

Tabelle A.3: Oberflächentemperatur im Zeitverlauf

Versuchszeit		Lufttemp. [ °C]	Durchschnittswert			Maximalwert		
Tag	Uhrzeit		Gesamtbild	Mantelfl.	Deckfl.	Gesamtbild	Mantelfl.	Deckfl.
1	18:00	11,0	20,2	23,2	NA	31,1	44,1	NA
18	21:00	12,0	19,7	21,5	NA	26,8	32,3	NA
19	06:15	13,4	18,1	19,0	22,5	25,5	33,9	28,4
33	05:30	20,1	23,2	22,1	23,6	26,7	31,4	27,4
54	05:30	18,5	20,4	21,5	NA	25,2	32,8	NA
67	21:30	18,0	22,4	22,9	27,3	26,0	35,0	38,5
102	20:30	19,0	22,0	23,5	23,0	28,4	34,7	28,1
103	05:30	14,8	17,0	17,6	NA	21,4	27,6	NA
116	21:00	14,5	19,1	18,3	NA	24,4	26,5	NA



## Messungen

Bx1	Max	22,0 ° C
	Min	1,7 ° C
	Average	7,1 ° C
	Area	3,480 m²

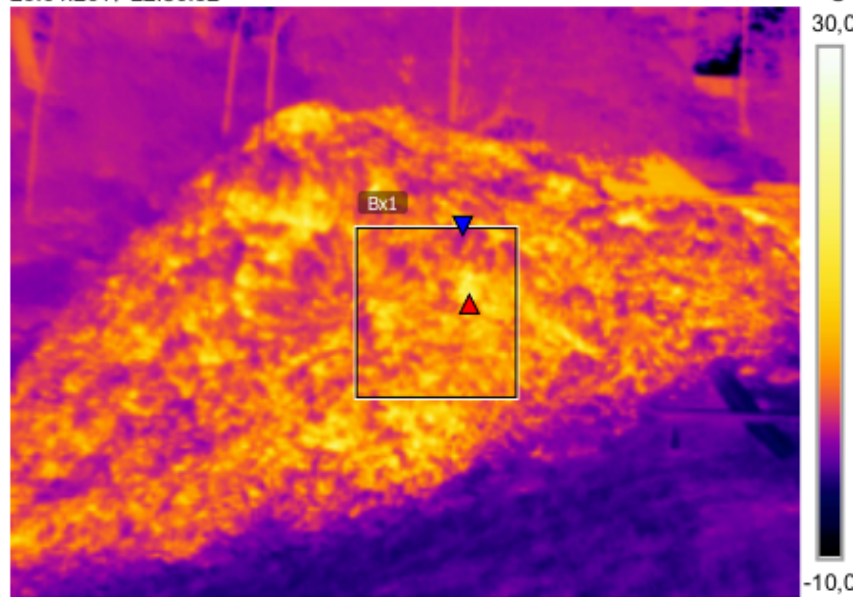
## Parameter

Emissionsgrad	0.85
Refl. Temp.	5 ° C

## Bildbeschreibung

Substratlager

26.04.2017 22:30:52



## Messungen

Bx1	Max	44,1 ° C
	Min	13,7 ° C
	Average	23,2 ° C
	Area	0,020 m²
Sp1		61,8 ° C

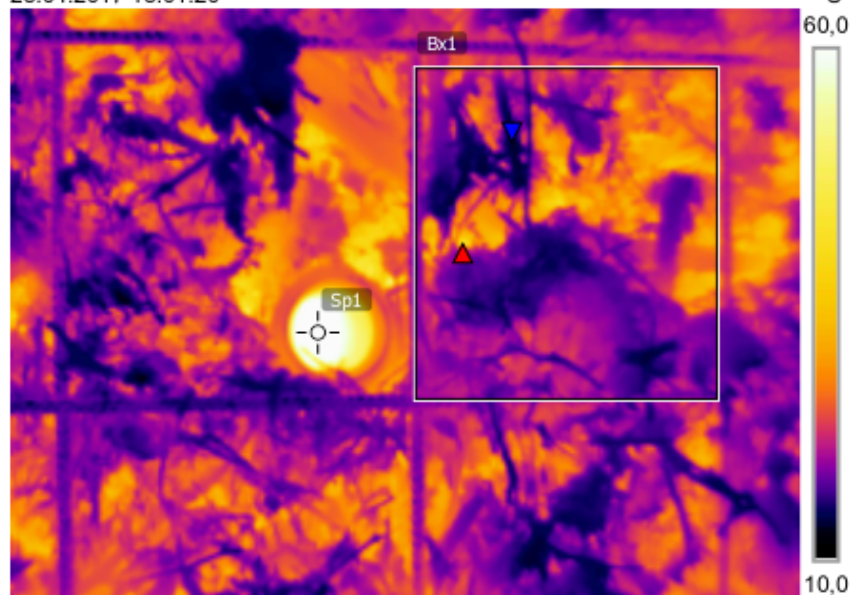
## Parameter

Emissionsgrad	0.85
Refl. Temp.	11 ° C

## Bildbeschreibung

Sensorrohr nach Aufbau, ungedämmt

28.04.2017 18:01:20



## Messungen

Bx1	Max	23,3 ° C
	Min	17,7 ° C
	Average	19,8 ° C
	Area	1,847 m²
Sp1		30,0 ° C
Sp2		33,3 ° C

## Parameter

Emissionsgrad	0.85
Refl. Temp.	18.5 ° C

## Bildbeschreibung

Wärmestau Konsole und Vorlauf

20.06.2017 05:34:57

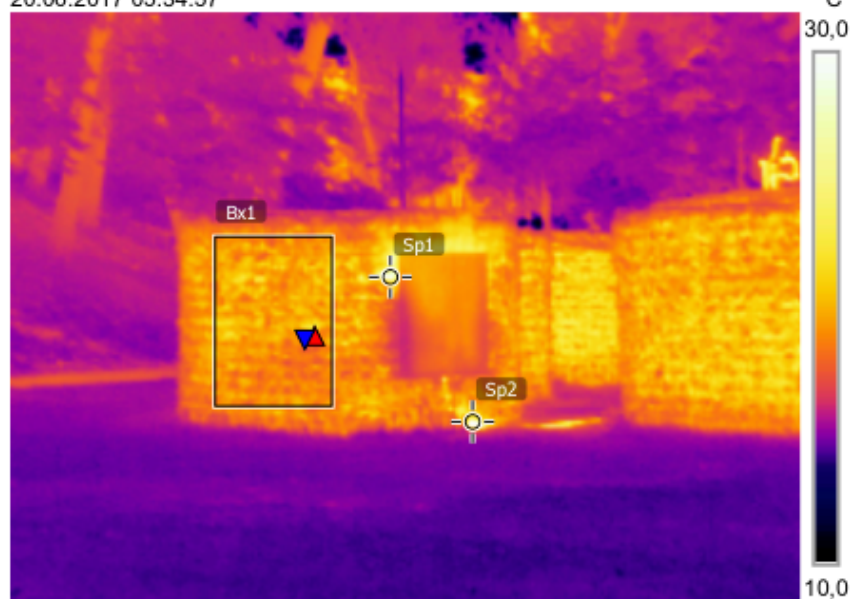
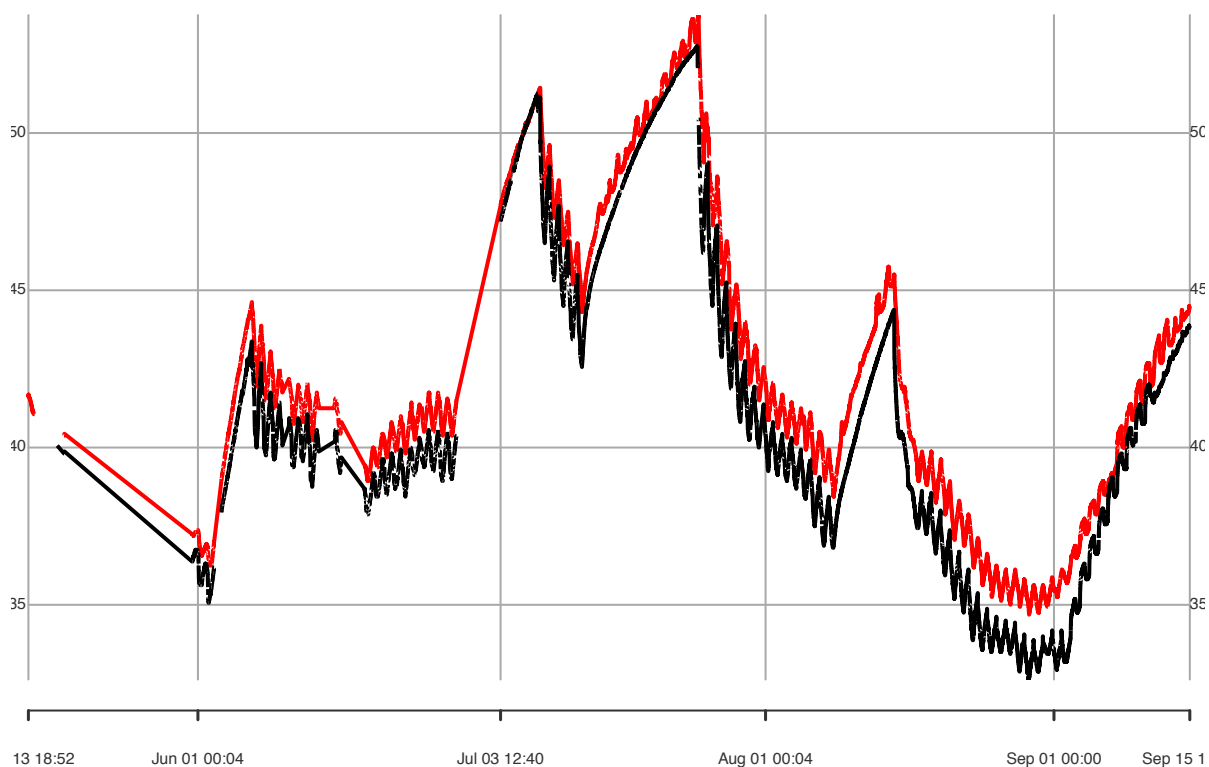
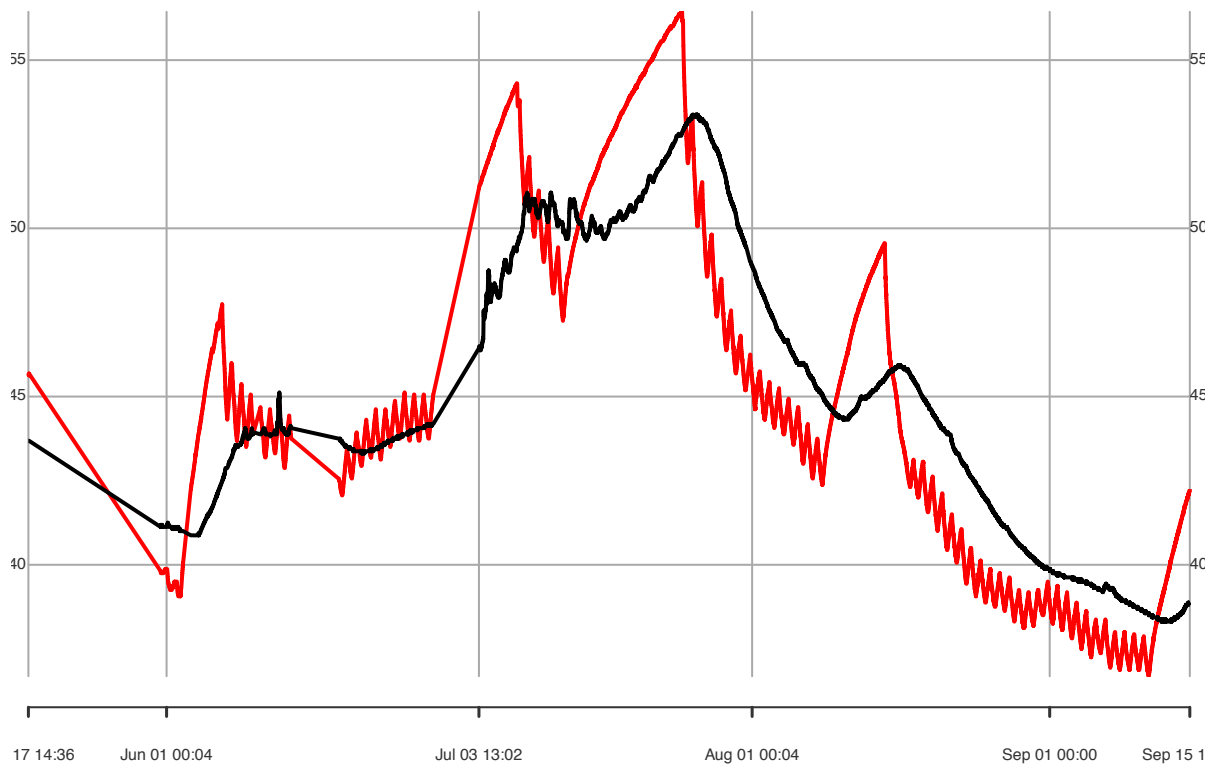


Abbildung A.8: Oberflächentemperatur ausgewählter Stellen

## A.6 Temperaturverläufe Seiten- und Mittensensor

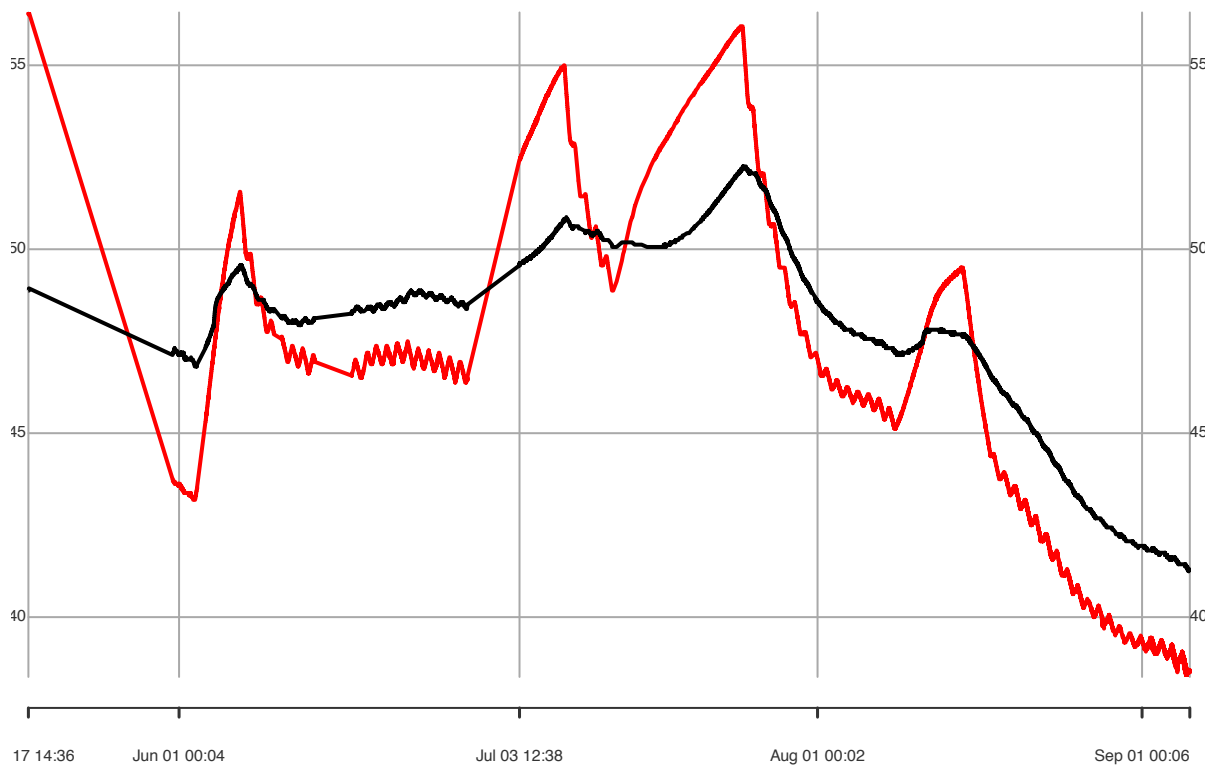


(a) BM 1B - Mittensensor (schwarz) und Seitensensor  $h_m$  (rot),  $\Delta s \approx 0,3$  m

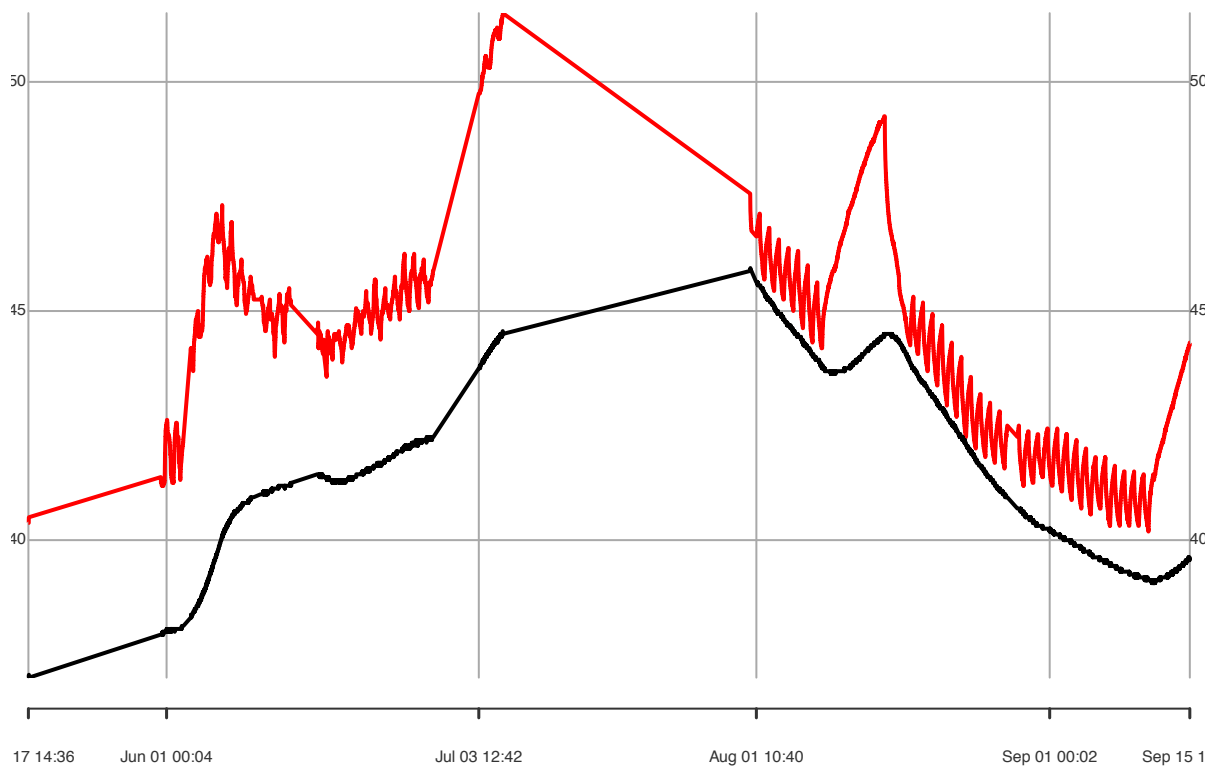


(b) BM 2D - Mittensensor (schwarz) und Seitensensor  $h_m$  (rot),  $\Delta s \approx 0,6$  m

Abbildung A.9: Temperaturverläufe im Abstand zum WÜ  $\Delta s$  (1)



(a) BM 3A - Mittensensor (schwarz) und Seitensensor  $h_m$  (rot),  $\Delta s \approx 1$  m



(b) BM 4B - Mittensensor (schwarz) und Seitensensor  $h_m$  (rot),  $\Delta s \approx 1,5$  m

Abbildung A.10: Temperaturverläufe im Abstand zum WÜ  $\Delta s$  (2)

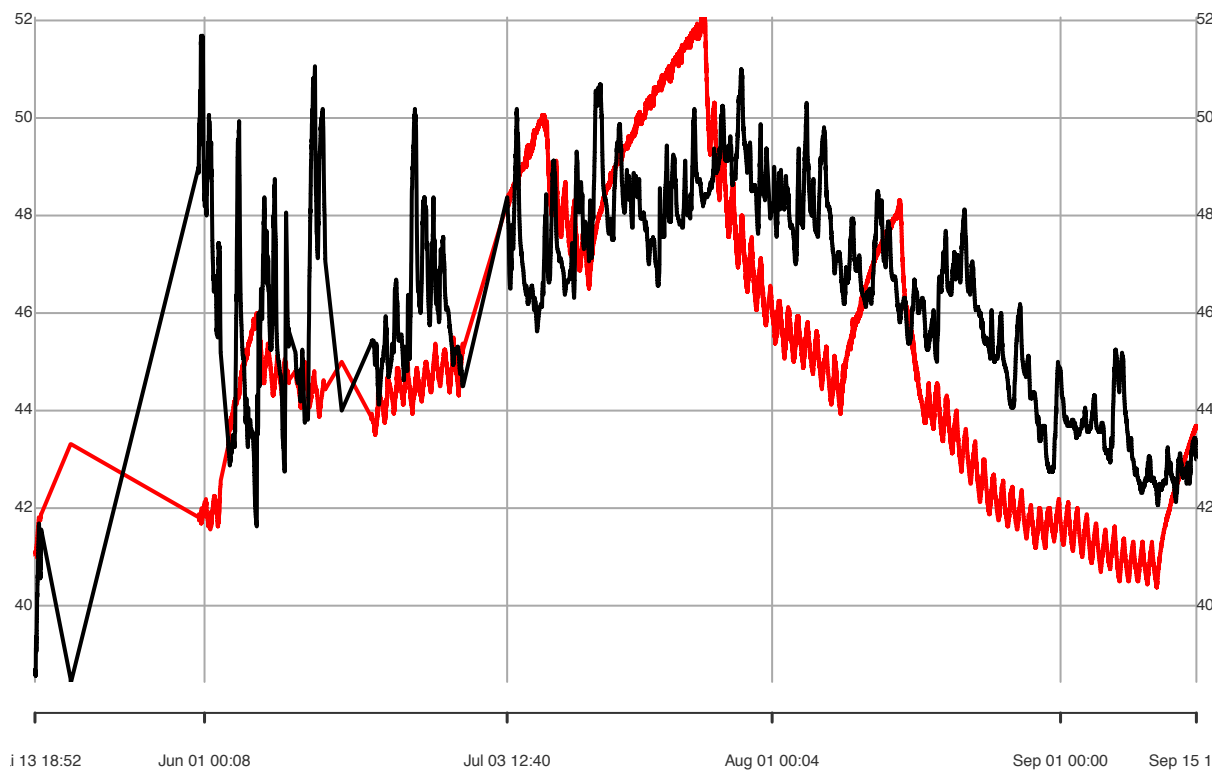


Abbildung A.11: BM 4A - Mittensensor (schwarz) und Seitensensor  $h_m$  (rot),  $\Delta s \approx 1,5$  m

## A.7 Abbau



Abbildung A.12: Abziehen des Silonet ermöglicht horizontale Schnittebene

# B Berechnungen

## B.1 Wetter

Tabelle B.1: Auswertung Wetterdaten im Versuchszeitraum

Wetterelement und Skala	Einordnung	Prozentualer Anteil an $t_v$ [%]
<b>Umgebungstemperatur</b> $\vartheta_U$ [°C]	Temperaturbereich	
-5 bis < 0	Frost	0,4
0 bis < 5		3,9
5 bis < 10	kühl	9,9
10 bis < 12,5		9,3
12,5 bis < 15	warm	13,8
15 bis < 25		<b>55,3</b>
25 bis < 35	heiß	7,4
<b>Niederschlag</b> [mm]	Niederschlagsintensität	
< 0,1	Leichter Sprühregen/kein Niederschlag	<b>93,1</b>
0,1 bis < 0,5	Mäßiger Sprühregen	3,8
0,5 bis < 2,5	Starker Sprühregen/leichter Regen	2,3
2,5 bis < 10,0	Mäßiger Regen	0,7
10,0	Starker Regen	0,1
<b>Windgeschwindigkeit</b> $w$ [m/s]	Beaufort-Skala	
0,0 bis < 0,3	0	<b>83,1</b>
0,3 bis < 1,6	1	16,5
1,6 bis < 3,4	2	0,4
3,4 bis < 5,5	3	0,0
<b>Windrichtung</b> [°]	Himmelsrichtung	
0	N	9,3
20		1,0
40	NO	<b>38,3</b>
60		1,3
80	O	8,8
100		0,3
130	SO	1,6
160		0,2
175	S	<b>33,7</b>
190		1,3
220	SW	0,0
250		2,0
265	W	0,6
280		0,0
315	NW	1,4
350		0,2



## B.2 Schüttdichte Substrat

Die Schüttdichte berechnet sich aus dem Quotient der Gewichtsmasse des Substrats  $m_S$  und des Volumens des Gefäßes  $V_K$ :

$$\varrho_S = \frac{m_S}{V_K} \quad (\text{B.1})$$

Somit ergibt sich aus den Werten in Tabelle B.2 das arithmetische Mittel aus allen Messungen mit:  $(342,33 \pm 8,4) \text{ kg/m}^3$ .



(a) Bereich mit eher Feinanteil

(b) Bereich mit eher Grobanteil

Abbildung B.1: Substrat der losen Schüttung nach dem Abladen

Tabelle B.2: Messung der losen Schüttung  $\varrho_S$

Probedatum	Gewicht [kg]	Gewicht ohne Behälter [kg]	$V_K [\text{m}^3]$	Schüttdichte $\varrho_S [\text{kg/m}^3]$	Durchschnitt $[\text{kg/m}^3]$	Standardabweichung $\sigma_{\varrho_S} [\text{kg/m}^3]$
25.04.17	11,820	10,191	0,029	349,968	342,241	6,930
	11,535	9,906	0,029	340,181		
	11,430	9,801	0,029	336,575		
28.04.17 (1)	11,688	10,059	0,029	345,435	344,837	10,651
	12,157	10,528	0,029	361,541		
	11,351	9,722	0,029	333,862		
	11,460	9,831	0,029	337,605		
	11,697	10,068	0,029	345,744		
28.04.17 (2)	11,311	9,682	0,029	332,488	338,223	6,399
	11,444	9,815	0,029	337,056		
	11,679	10,050	0,029	345,126		

Die Schüttdichte der komprimierten Schüttung  $\varrho_{SK}$  berechnet sich ebenfalls nach der Gleichung C.5. Somit ergibt sich aus den Werten in Tabelle B.3 das arithmetische Mittel aus allen Messungen mit:  $(496,67 \pm 17,36) \text{ kg/m}^3$ . Dies entspricht einer Komprimierung bei 60 kg auf  $(145,1 \pm 8,6) \%$  bei Fehlerfortpflanzung mittels Taylorpolynom (siehe Abschnitt C.2).

Tabelle B.3: Messung der komprimierten Schüttung  $\varrho_{SK}$

Probedatum	Gewicht [kg]	Gewicht ohne Behälter [kg]	$V_K$ [m <sup>3</sup> ]	Schüttdichte $\varrho_{SK}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Durchschnitt [kg/m <sup>3</sup> ]	Standardabweichung $\sigma_{\varrho_{SK}}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Komprimierung [%]
25.04.17	16,030	14,401	0,029	494,543	510,283	13,644	149,1
	16,735	15,106	0,029	518,753			
	16,700	15,071	0,029	517,551			
28.04.17 (1)	15,700	14,071	0,029	483,210	499,957	16,159	145,0
	16,224	14,595	0,029	501,205			
	16,639	15,010	0,029	515,457			
28.04.17 (2)	15,700	14,071	0,029	483,210	479,776	5,948	141,9
	15,400	13,771	0,029	472,908			
	15,700	14,071	0,029	483,210			

### B.3 Trockensubstanz

Die Probenahme erfolgt am 25.04.17 (BM 1A, 2C, 2D) und am 28.04.17 (BM 3A, 2A). Die Trockensubstanz wird im Labor mittels Vierfachbestimmung ermittelt (siehe Tab. B.4). Die Trockensubstanz berechnet sich nach:

$$TS_S = \frac{m_S - m_{leer}}{m_{trock} - m_{leer}} * 100 \quad (\text{B.2})$$

Der Fehler ergibt sich aus der Standardabweichung der Messungen. Die Messungenauigkeit der Waage wird vernachlässigt. Die Trockensubstanz des gelieferten Substrats ergibt sich mit  $TS_S = (62,3 \pm 1) \%$  und entsprechend  $W_S = (37,7 \pm 1) \%$ .

Tabelle B.4: Ermittlung der Trockensubstanz des gelieferten Substrats, 4.5.17

	Tiegel leer $m_{leer}$ [g]	Tiegel voll $m_S$ [g]	Tiegel nach Trocknen $m_{trock}$ [g]	$TS_S$ [%]
Probe 1	936,77	1704,40	1425,98	63,73
	828,31	1909,51	1500,18	62,14
Probe 2	863,95	1839,57	1461,45	61,24
	843,33	1797,31	1434,89	62,01

### B.4 Wasserzusatz und -gehalt

Die Wasser-Füllung der Rohrschleifen im Biomeiler ergibt sich aus 3 x 100 m Rohr-WÜ multipliziert mit Füllung für 1'-Rohre 0,531 L/m [Quelle]. Dies ergibt eine Gesamtfüllung von 159 L WÜ-System ohne Verbindungsrohre und ohne Luft im System.

Wenn zwei Biomeiler gleichzeitig aufgebaut und gewässert werden, berechnet sich der Wasserzusatz  $V_{ZH_2O}$  aus den Volumenverhältnissen (Tab. 5.2) der Biomeiler  $V_{BM_{i..j}}$  wie folgt:

$$V_{ZH_2O_{BM_i}} = \Delta V_{H_2O_{BM_i+BM_j}} * \frac{V_{BM_i}}{V_{BM_i} + V_{BM_j} + V_{BM_k}} \quad (\text{B.3})$$

Tabelle B.5: Dokumentation Wasserzusatz

Datum	Zählerstand [m <sup>3</sup> ]	Differenz	Abzug [m <sup>3</sup> ]	bereinigte Diffe- renz $\Delta V_{H_2O_{BM_i+BM_j}}$	geschätzter Fehler $\sigma_{V_{H_2O_{BM_i+BM_j}}}$	Zeitpunkt	Bemerkung
25.04.17	99					Vor Wässerung	
26.04.17	107,80	8,80	0	8,80	+0,0 -0,7	nach Abschluss BM 3A und 2A	
27.04.17	111,30	3,50	-0,1	3,40	±0,2	nach Abschluss BM 1A und 2B	ab hier – 0,1 m <sup>3</sup> wegen Verlust/Säuberungen o.ä.
29.04.17	118,20	6,90	-0,35	6,55	±0,3	nach Abschluss BM 2C und 2D	BM-Befüllung, Abzug von 0,25 m <sup>3</sup> (0,15 m <sup>3</sup> Befüllung von 3 Rohrschleifen und 0,1 m <sup>3</sup> Füllung Spül-Behälter)
02.05.17	122,69	4,49	-0,1	4,39	±0,2	nach Abschluss BM 1B und 3B	
03.05.17	126,30	3,61	-0,1	3,51	±0,2	nach Abschluss BM 4B	
04.05.17	129,34	3,04	-0,1	2,94	±0,2	nach Abschluss BM 4A	
05.05.17	130,18	0,84	-0,1	0,74	±0,2	nach Abschluss BM 1C	
-	130,78	0,60	0	0,60	±0,0	BM 4B, 4A, 1C von oben gewässert	
-	148,28	11,50	-15	1,50	±1,0	BM 4B von oben gewässert	Abzug pauschal 15 m <sup>3</sup> BM-Befüllung (10 mal 0,15 m <sup>3</sup> Befüllung und 0,1 m <sup>3</sup> Füllung Spültonne und mehrere Tage spülen) wegen Pflanzenbewässerung, Nebelmaschine
-	149,17	0,88	0	0,88	±0,0	BM 1C von oben gewässert	
-	151,05	1,88	0	1,88	±0,0	BM 4A von oben gewässert	

Aus den positiven und negativen Fehlerintervallen für den Wasserzusatz  $V_{ZH_2O_{BM_i}}$  kann die Berechnung des Wassergehalts der Biomeiler  $W_{BM_{i..j}}$  nach Gleichung 6.1 erfolgen. Die Ergebnisse sind in Tabelle B.6 zusammengestellt. Die Fehlerrechnung erfolgt wie in Abschnitt C.4 beschrieben.

Tabelle B.6: Berechnung des Wasserzusatz und Wassergehalts mit Fehler

Größe	Wasserzusatz $V_{ZH_2O_{BM_i}}$ [m <sup>3</sup> ]	Fehler [m <sup>3</sup> ]	$\sigma_{V_{ZH_2O_{BM_i}}}$	Wassergehalt $W_{BM_i}$ [%]	Fehler $\sigma_{W_{BM_i}}$ [%]
1 A	1,206	± 0,14		44,0	±1,5
B	1,405	±0,13		43,8	±1,4
C	1,710	±0,20		45,9	±1,7
2 A	3,936	+0,12 -0,44		48,1	+1,4 -1,8
B	2,264	±0,19		44,2	±1,5
C	3,429	±0,25		47,3	±1,5
D	3,124	±0,23		47,3	±1,5
3 A	4,859	+0,12 -0,51		48,1	+1,3 -1,7
B	2,982	±0,20		43,8	±1,3
4 A	5,064	±0,20		46,3	±1,3
B	6,283	±1,20		47,2	±2,1

Aus den Daten der Tabelle B.5 geht hervor, dass die BM 1C, 4A und 4B ungefähr die Hälfte ihres zugeführten Wasservolumens  $V_{ZH_2O_{BM_i}}$  nach Bauabschluss erhalten haben. D.h. dass vor allem die Deckschicht gut gewässert wird und nicht nachweisbar ist, wie tief das Wasser in den Festbettreaktor eingedrungen ist. Dies wird bei der bei Wassergehaltsberechnung vernachlässigt, weil von einer gleichmäßigen Wasserverteilung im System als Ausgangszustand der Biomeiler ausgegangen wird. Der Wassergehalt der Biomeiler befindet sich zwischen 43,8 und 48,1 % bei einer durchschnittlichen Abweichung von ± 1,5 %.



## B.5 Korngröße und oTS des Substrats

Die Daten der Messungen zur Korngröße des Substrats sind in Tabelle B.7 dargestellt und in Tabelle B.8 ausgewertet.

Tabelle B.7: Daten der Siebanalyse, 12.5.17

Siebe	Probe 1 [g]					Probe 2 [g]				
	Teil1	Teil2	Teil3	Teil4	Gesamt	Teil1	Teil2	Teil3	Teil4	Gesamt
Gesamt	1816,97	1900,32	1843,70	1981,97	7542,96	1886,81	2013,32	1906,60	1914,53	7721,26
> 16mm	503,01	460,39	532,64	472,45	1968,49	486,40	510,53	504,48	468,80	1970,21
> 8mm	413,74	427,35	421,28	444,42	1706,79	430,43	436,05	423,51	439,40	1729,39
> 3, 15mm	421,78	439,89	425,64	457,65	1744,96	448,10	450,59	446,71	439,63	1785,03
Boden	475,50	572,65	464,08	607,52	2119,75	521,82	616,21	531,95	565,92	2235,90

Tabelle B.8: Berechnung der Korngrößenverteilung des Substrats

	Gewicht [g]	Korngrößenanteil $a_i$ [%]	Summenverteilung [%]
Probe 1 Gesamt	2777,56		
Sieb > 16mm	171,01	15,74	100,00
Sieb > 8mm	80,27	7,39	84,26
Sieb > 3, 15mm	187,00	17,22	76,87
Boden	647,95	59,65	59,65
Probe 2 Gesamt	1266,77		
Sieb > 16mm	172,73	13,64	100,00
Sieb > 8mm	102,87	8,12	86,36
Sieb > 3, 15mm	227,07	17,93	78,24
Boden	764,10	60,32	60,32

Die Gewichtsfraktionen aus dem Siebturm werden nochmals getrocknet und verglüht. Es erfolgt eine Mehrfachbestimmung (Wdh.) des Glühverlusts. Bezogen auf die in Abschnitt B.3 errechnete Trockensubstanz  $TS_S$  kann die organische Trockensubstanz wie folgt berechnet werden:

$$oTS_{S_i} = \frac{m_{trock} - m_{glueh}}{m_{trock} - m_{leer}} * TS_S * 100 \quad (B.4)$$

Tabelle B.9: Berechnung der organischen Trockensubstanz des Substrats

		$m_{leer}$ [g]		$m_{trock}$ [g]		$m_{glueh}$ [g]		Glühverlust [% $_{GV}$ ]			$oTS_{S_i}$ [% $_{oTS}$ ]	$oTS_S$ [% $_{oTS}$ ]
Wdh.		1	2	1	2	1	2	1	2	$\overline{GV}$		
Probe 1	> 16mm	32,60	29,45	33,16	30,20	32,75	29,69	73,66	68,73	71,20	26,84	25,28
	> 8mm	18,00	18,51	18,66	19,46	18,25	18,90	61,09	59,41	60,25	22,71	
	> 3, 15mm	12,33	12,89	13,31	13,72	12,88	13,33	43,67	46,76	45,22	17,04	
	Boden	13,00	12,39	14,50	13,79	14,07	13,38	28,22	29,25	28,74	10,83	
Probe 2	> 16mm	25,12	29,45	26,02	30,23	25,45	29,62	63,75	77,43	70,59	26,61	25,35
	> 8mm	35,54	28,93	35,96	29,65	35,66	29,22	72,56	59,36	65,96	24,86	
	> 3, 15mm	12,75	12,90	13,57	13,71	13,12	13,30	54,93	49,82	52,37	19,74	
	Boden	13,85	11,20	15,25	12,35	14,84	12,06	29,24	24,92	27,08	10,20	

Zur Berechnung des  $oTS_S$  des gesamten Substrats wird Gl. B.5 verwendet. Es ergibt sich ein mittlerer  $oTS_S$  von 25,3 % $_{oTS}$ .

$$oTS_S = \sum oTS_{S_i} * a_i \quad (B.5)$$

## B.6 Korngröße und oTS der kompostierten Biomasse

Die Daten der Messungen zur Korngröße werden analog zur Korngrößenbestimmung des Substrats in einer Vierfachbestimmung durchgeführt. Die Daten werden in Tabelle B.10 ausgewertet.

Tabelle B.10: Berechnung der Korngrößenverteilung der kompostierten Biomasse

	Gewicht [g]	Korngrößenanteil $a_i$ [%]	Summenverteilung [%]
Randzone Gesamt	2878,40		
Sieb > 16mm	112,01	3,89	100,00
Sieb > 8mm	157,70	5,48	84,26
Sieb > 3, 15mm	341,66	11,87	76,87
Boden	2267,56	78,76	59,65
Mittelzone Gesamt	2943,63		
Sieb > 16mm	232,91	7,91	100,02
Sieb > 8mm	172,49	5,86	92,11
Sieb > 3, 15mm	650,03	22,08	86,25
Boden	1888,77	64,16	64,16
Kernzone Gesamt	3004,36		
Sieb > 16mm	252,20	8,39	100,01
Sieb > 8mm	197,47	6,57	91,61
Sieb > 3, 15mm	644,20	21,44	85,04
Boden	1910,75	63,60	63,60

Die Berechnung des  $oTS_P$  der kompostierten Biomasse erfolgt analog zu Gleichung B.4 und B.5. Der Abbaugrad wie in Gleichung B.6 auf  $oTS_S$  bezogen.

$$\eta = \frac{oTS_S - oTS_P}{oTS_S} \quad (\text{B.6})$$

Tabelle B.11: Berechnung der organischen Trockensubstanz der kompostierten Biomasse

Wdh.	$m_{leer}$ [g]		$m_{troch}$ [g]		$m_{glueh}$ [g]		$oTS_{P_i}$ [% $_{oTS}$ ]		$\overline{oTS_{P_i}}$	$oTS_P$ [% $_{oTS}$ ]	$\eta$ [%]
	1	2	1	2	1	2	1	2			
Randzone Boden	12,95	12,84	16,28	15,60	15,70	15,14	10,20	9,83	10,02	15,0	41
> 3, 15mm	12,33	12,85	14,44	15,01	13,61	14,19	22,97	22,03	22,50		
> 8mm	11,44	11,32	12,83	12,39	12,01	11,49	34,15	48,80	41,48		
> 16mm	12,33	12,86	13,43	13,86	12,37	12,90	55,49	55,80	55,65		
Mittelzone Boden	11,23	12,24	15,21	15,69	14,64	15,07	8,28	10,36	9,32	18,0	29
> 3, 15mm	12,89	13,00	14,84	15,27	14,08	14,49	22,76	19,99	21,37		
> 8mm	12,63	11,47	14,01	12,88	13,07	11,78	39,59	45,17	42,38		
> 16mm	12,51	11,10	13,58	12,18	12,56	11,14	55,49	55,88	55,69		
Kernzone Boden	11,38	11,20	15,03	14,30	14,41	13,63	9,80	12,60	11,20	21,0	17
> 3, 15mm	11,27	13,85	13,60	15,70	12,63	14,81	24,23	28,05	26,14		
> 8mm	12,75	12,72	13,87	13,71	13,02	12,91	44,17	46,62	45,40		
> 16mm	12,39	8,69	13,30	9,67	12,50	8,74	51,26	54,75	53,00		

## B.7 Volumenschwund

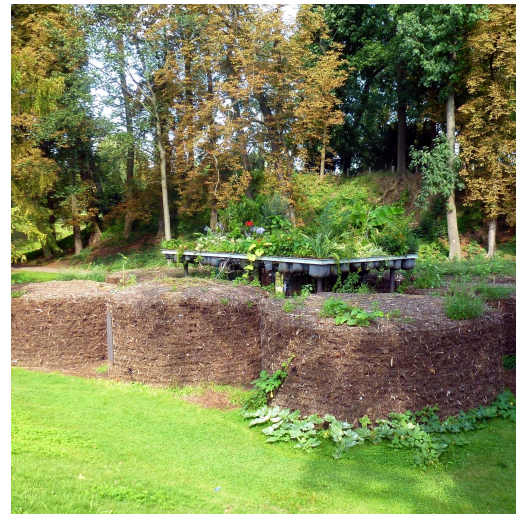
Der durchschn. Volumenschwund berechnet sich aus dem Mittelwert der Höhendifferenzen aus Tabelle B.12. Die Ausgangswerte der Berechnung (Aufbauhöhe der Biomeiler) weist besonders bei BM 1B, 2A und 2B aufgrund der Deckschichtform einen hohen Fehler (+10cm) auf.

Tabelle B.12: Messung der Biomeilerhöhe  $t_v = 128 d$

Größe		Höhe $h_{BM}$ [m]						$\overline{h_{BM}}$ [m]	$\sigma_{h_{BM}}$ [m]	Vol.-schwund [%]
1	A	1,90	1,90	1,94	1,93	2,00	1,95	1,94	0,04	15,8
	B	2,23	2,24	2,12	2,10	2,09	2,05	2,14	0,08	20,8
	C	2,08	2,06	1,97	1,94	1,96	2,05	2,01	0,06	19,6
2	A	1,80	1,80	1,85	1,84	1,78	1,88	1,83	0,04	27,0
	B	2,00	2,00	2,00	1,97	1,96	2,00	1,99	0,02	26,4
	C	2,00	1,92	1,89	1,88	1,91	2,00	1,93	0,05	22,7
	D	1,96	1,87	1,94	1,90	1,94	2,00	1,94	0,05	22,6
3	A	1,94	1,94	2,00	1,97	1,95	1,93	1,96	0,03	21,8
	B	1,87	1,93	1,94	2,00	1,97	1,90	1,94	0,05	22,6
4	A	2,00	1,94	1,97	2,00	1,94	2,05	1,98	0,04	20,7
	B	1,98	1,95	1,97	1,93	1,95	1,93	1,95	0,02	21,9



(a) Biomeiler nach Aufbau



(b) Biomeiler vor Abbau

Abbildung B.2: Versuchsfeld vor und nach dem Versuchszeitraum

## B.8 Rotationssymmetrie der Daten der Temperatursensoren

Die Rotationssymmetrie wird beispielhaft für die Temperatursensoren zweier Messstellen der BM Größe 2 für den Versuchszeitraum 15.05.-15.09.2017 überprüft. Die Auswahl der Messstellen erfolgt nach Vollständigkeit der Daten. Der Fehler errechnet sich aus der Summe der maximalen Temperaturabweichung durch Messmittelfehler ( $\pm 0,5$  K insges. 2,0 K) und Aufbaufehler ( $\pm 0,3$  K insges. ca. 1,0 K). Zur rechnerischen Überprüfung wird ein Signifikanztest mit folgenden Annahmen durchgeführt:

- Nullhypothese: Die Abweichungen der Datensätze sind größer als ihr Fehler
- Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha$ : 80 %
- Parameter des Datensatzes:  $\vartheta$

Die Ergebnisse sind in Tabelle B.13 aufgetragen. Die Nullhypothese kann für 7 von 12 *MP*-Vergleichen für 2 K verworfen werden. Für 3 K können alle Nullhypothesen verworfen werden. Entsprechend ergibt sich auch hier eine Bestätigung der Annahme zur Rotationssymmetrie.

Tabelle B.13: Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha$  für die Überprüfung der Rotationssymmetrie, Temperatursensoren

Schichthöhe		Anzahl Datensätze	$\alpha$ [%]	Fehler [ K]
BM 2A $MS(SUD \cap OST)$	$h_o$	24169	100,0	2,0
	$h_m$	17421	92,0	2,0
	$h_u$	25212	11,4	2,0
	$h_u$	25212	83,5	3,0
BM 2B $MS(SUD \cap WEST)$	$h_o$	14112	40,5	2,0
	$h_o$	14112	83,5	3,0
	$h_m$	13594	39,1	2,0
	$h_m$	13594	83,2	3,0
	$h_u$	23304	70,3	2,0
	$h_u$	23304	93,3	3,0
BM 2C $MS(SUD \cap NORD)$	$h_o$	19161	93,3	2,0
	$h_m$	19671	100,0	2,0
	$h_u$	20967	100,0	2,0
BM 2D $MS(SUD \cap OST)$	$h_o$	25279	98,0	2,0
	$h_m$	25583	100,0	2,0
	$h_u$	28140	76,5	2,0
	$h_u$	28140	90,8	3,0

## B.9 Schüttdichtemessung Produkt

Die Ergebnisse der Gewichtsmessung sind in Tabelle B.14 aufgetragen. Die Berechnung der Schüttdichte  $\varrho_B M$  erfolgt mit Gl. B.7. Dabei beträgt das Bohrergewicht  $m_{Bohrer} = 1998,5$  g und das Volumen des Bohrkerns  $V_{Bohrer} = 0,000298$  m<sup>3</sup>. Die Ergebnisse sind in Abbildung A.5 dargestellt.

$$\varrho_B M = \frac{m_{BB} - m_{Bohrer}}{1000 * V_{Bohrer}} \quad (B.7)$$

Tabelle B.14: Messung des Bohrergewichts inkl. Produktprobe [g] am 19. und 20.9.17

Wdh.	Höhe der Schicht				
	1,8 m (BM 2D)	1,6 m (BM 2D)	1,4 m (BM 4A)	1,0 m (BM 4A)	0,5 m (BM 4A)
1	2212,2	2157	2247	2278	2234,8
2	2216,5	2176,7	2230,9	2279,9	2251,6
3	2144,6	2168,3	2260,2	2253,8	2269,6
4	2164,5	2140,3	2254,9	2247	2263,2
5	2175,6	2144,3	2228,8	2263,9	2263,8
6	2202,9	2208,2	2257,2	2259,3	2261,8
7	2202,9	2203,6	2234,9	2251,8	2256,1
8	2208,3	2191,8	2254,2	2252,7	2173,1
9	2182	2168,9	2225	2263,2	2174,1
10		2217,9	2275,3	2261,1	2223,7

# C Fehlerrechnungen

## Allgemein

Arithmetisches Mittel:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (\text{C.1})$$

Varianz:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (\text{C.2})$$

Standardabweichung:

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (\text{C.3})$$

Fehlerfortpflanzung mittels Taylorpolynom:

$$\sigma_f = \sum_{i=1}^n \left| \left( \frac{\delta f}{\delta x_i} \right) \right| * \sigma_{x_i} \quad (\text{C.4})$$

## C.1 Messmethode Schüttdichte Substrat

Für die Methodenentwicklung zur Schüttdichtemessung wird eine Mehrfachbestimmung aus ca. 25 kg Probe durchgeführt. Dazu wird ein definiertes Volumen gefüllt und das Gewicht vermessen. Für eine realistische Messung der Schüttung ist es notwendig, dass die maximale Größe der Partikel 10 % des Durchmessers des Gefäßes nicht überschreiten. Hierfür ist es notwendig, vereinzelt Holzteile auszusortieren (vgl. Abb. B.1). Die Volumen der Gefäße berechnet sich beim Rechteck zu  $V = l * b * h$  und beim Kegelstumpf zu  $V = h * \frac{\pi}{3} * (d_o^2 + d_o * d_u + d_u^2)$ . Zur Bewertung der Genauigkeit des Messverfahrens bezüglich der Gefäßwahl wird die Varianz  $\sigma^2$  bestimmt. Aus Tabelle C.2 wird deutlich, dass die Varianz bei Messungen im Kübel am geringsten ist. Zusätzlich dazu werden aufgrund des größeren Durchmessers im Vergleich zum Eimer weniger Holzteile aussortiert (siehe auch Abb. B.1). Dies führt zu einer realistischeren Messung der komprimierten Schüttung  $\rho_{SK}$ . Die Messung in der Wanne besitzt sowohl eine hohe Standardabweichung als auch ein zu hohes Gewicht für den Messbereich der Waage ( $< 17$  kg).



(a) Eimer



(b) Wanne



(c) Kübel

Abbildung C.1: Gefäße getestet für Schüttdichtemessung

Tabelle C.1: Daten der Gefäße für Schüttdichteberechnung

Gefäße	Geometrie	$d_o/l$ [m]	$d_u / b$ [m]	Füllhöhe $h$ [m]	$m$ [kg]	$V$ [m <sup>3</sup> ]
Eimer	Kegelstumpf	0,255	0,200	0,250	0,310	0,010
Wanne	Rechteck	0,700	0,380	0,160	2,470	0,043
				0,125		0,033
Kübel	Kegelstumpf	0,550	0,460	0,145	1,629	0,029

Tabelle C.2: Vergleich der Schüttdichten je nach Gefäß

Behälter	Gewicht [kg]	Gewicht ohne Behälter [kg]	$V$ [m <sup>3</sup> ]	Schüttdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Durchschnitt [kg/m <sup>3</sup> ]	Varianz [(kg/m <sup>3</sup> ) <sup>2</sup> ]	$\sigma^2$
Eimer (1)	4,717	4,407	0,010	431,559	430,155	76,585	
	4,784	4,474	0,010	438,120			
	4,607	4,297	0,010	420,787			
Eimer (2)	4,005	3,695	0,010	361,836	382,107	1020,252	
	4,043	3,733	0,010	365,557			
	4,588	4,278	0,010	418,927			
Eimer $\varrho_{SK}$	7,188	6,878	0,010	673,534	656,527	229,000	
	6,892	6,582	0,010	644,548			
	6,963	6,653	0,010	651,500			
Wanne	15,720	13,250	0,043	311,325	366,181	2258,917	
	15,510	13,040	0,033	392,180			
	15,605	13,135	0,033	395,038			
Kübel	11,820	10,191	0,029	349,968	342,241	48,027	
	11,535	9,906	0,029	340,181			
	11,430	9,801	0,029	336,575			
Kübel $\varrho_{SK}$	16,030	14,401	0,029	494,543	510,283	186,162	
	16,735	15,106	0,029	518,753			
	16,700	15,071	0,029	517,551			

## C.2 Schüttdichte Substrat

Der Fehler der Schüttdichte errechnet sich aus der Standardabweichung aller Messwerte jeweils für die lose und komprimierte Schüttung, Gl. C.3. Die Messgenauigkeit der Waage wird vernachlässigt. Zur Berechnung der Komprimierung  $K_1$  wird nach Taylor (Gl. C.6) wie folgt gerechnet:

$$\sigma_{Verdichtung} = \left( \left| \frac{1}{\rho_S} \right| * \sigma_{\rho_{SK}} \right) + \left| \frac{\rho_{SK}}{\rho_S^2} \right| * \sigma_{\rho_S} * 100 \quad (C.5)$$

## C.3 Volumen Biomeiler

Lt. ALBA werden 24 Container à  $30 \text{ m}^3 \cong 720 \text{ m}^3$  geliefert (siehe Abschnitt 5.1.2.2). Durch Setzung während der Fahrt (0,5 m) zum Versuchsfeld wird von einer Lieferung von  $27,5 \text{ m}^3 \pm 1 \text{ m}^3$  ausgegangen. Dies entspricht  $V_{geliefert} = (660 \pm 24) \text{ m}^3$ .

Aufgrund der Vorgaben des Künstlers, werden einzelne Biomeiler mit einer sog. Haube versehen. D.h. ihre Deckschicht schließt nicht horizontal ab, sondern besitzt die Form eines Kegelstumpfs. Entsprechend sind die Höhenangaben der Biomeiler mit unterschiedlichen Fehlern geschätzt (siehe Tab. C.3). Nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz (Gl. C.6) wird der Volumenfehler  $\sigma_{V_{BM}}$  wie folgt berechnet:

$$\sigma_{V_{BM}} = \left| \frac{\pi}{4} * 2 * d * h \right| * \sigma_d + \left| \frac{\pi}{4} * d^2 \right| * \sigma_h \quad (C.6)$$

Insgesamt ergibt sich ein befülltes Volumen von  $V_{BMgesamt} = (461 \pm 14) \text{ m}^3$ .

Wird  $V_{geliefert}$  und  $V_{BMgesamt}$  ins Verhältnis gesetzt ergibt sich die Komprimierung  $K_2$  mit Gleichung C.7 und C.8 zu  $(143 \pm 10) \%$ .

$$K_2 = \frac{V_{geliefert}}{V_{BMgesamt}} * 100 \quad (C.7)$$

Fehlerfortpflanzung nach Taylor (Gleichung C.6):

$$\sigma_{K_2} = \left| \frac{1}{V_{fuellgesamt}} * 100 \right| * \sigma_{V_{geliefert}} + \left| - \frac{V_{geliefert}}{V_{fuellgesamt}^2} * 100 \right| * \sigma_{V_{fuellgesamt}} \quad (C.8)$$

## C.4 Trockensubstanz, Wasserzusatz und Wassergehalt

Der Fehler der Trockensubstanz ergibt sich aus der Standardabweichung der Messwerte aus Tabelle B.4 zu  $\pm 1 \%$ .

Wenn zwei Biomeiler gleichzeitig aufgebaut und gewässert werden, wird zur Berechnung des für den Wasserzusatz  $V_{ZH_2O}$  Gleichung B.3 verwendet. Der Fehler  $\sigma_{V_{ZH_2O_{BM_i}}}$  ergibt sich für aus

Tabelle C.3: Fehlerrechnung zur Volumenbestimmung der Biomeiler

Größe	Durchmesser [m]	Fehler $\sigma_d$ [m]	Höhe [m]	Fehler Höhe $\sigma_h$ [m]	Volumen [m <sup>3</sup> ]	Fehler Volumen $\sigma_{V_{BM_i}}$ [m <sup>3</sup> ]	
1	A	3,45	± 0,03	2,30	± 0,03	21,50	0,65
	B	3,50	± 0,03	2,70	± 0,05	25,98	0,93
	C	3,40	± 0,03	2,50	± 0,03	22,70	0,67
2	A	4,50	± 0,03	2,50	± 0,05	39,76	1,33
	B	4,30	± 0,03	2,70	± 0,10	39,21	2,00
	C	4,40	± 0,03	2,50	± 0,03	38,01	0,97
	D	4,20	± 0,03	2,50	± 0,03	34,64	0,91
3	A	5,00	± 0,03	2,50	± 0,03	49,09	1,18
	B	5,30	± 0,03	2,50	± 0,05	55,15	1,73
4	A	5,70	± 0,03	2,50	± 0,05	63,79	1,95
	B	6,00	± 0,03	2,50	± 0,05	70,69	2,12

dem Fehlerfortpflanzungsgesetz nach Taylor siehe Gleichung C.9:

$$\sigma_{V_{ZH_2O_{BM_i}}} = \frac{1}{(V_{BM_i} + V_{BM_j})^2} * \left( V_{BM_i} * (V_{BM_i} + V_{BM_j}) * \sigma_{\Delta V_{H_2O_{BM_i+BM_j}}} + \right. \quad (C.9)$$

$$\left. \Delta V_{H_2O_{BM_i+BM_j}} * V_{BM_j} * \sigma_{V_{BM_i}} + \Delta V_{H_2O_{BM_i+BM_j}} * V_{BM_i} * \sigma_{V_{BM_j}} \right)$$

Werden die Biomeiler zu mehreren Zeitpunkten gewässert, werden die Fehler addiert. Die errechneten Daten für jeden Biomeiler finden sich in Tabelle B.6.

Mit Gleichung 6.1 wird der Wassergehalt  $W_{BM_{i..j}}$  der Biomeiler berechnet. Für die Berechnung des Fehlers  $\sigma_{W_{BM_{i..j}}}$  wird die Fehlerfortsetzung nach Taylor (Gl. C.10) angewandt. Die Ergebnisse sind in Tabelle B.6 aufgetragen.

$$\sigma_{W_{BM_i}} = \frac{\varrho_{H_2O} * TS_S}{(V_{BM_i} * \varrho_{SK} + V_{ZH_2O_{BM_i}} * \varrho_{H_2O})^2} * \left( \varrho_{SK} * V_{ZH_2O_{BM_i}} * \sigma_{V_{BM_i}} + V_{BM_i} * V_{ZH_2O_{BM_i}} * \sigma_{\varrho_{SK}} + \right.$$

$$\left. \frac{(V_{BM_i} * \varrho_{SK} + V_{ZH_2O_{BM_i}} * \varrho_{H_2O}) * V_{BM_i} * \varrho_{SK}}{\varrho_{H_2O} * TS_S} * \sigma_{TS_S} + V_{BM_i} * \varrho_{SK} * \sigma_{V_{ZH_2O_{BM_i}}} \right) \quad (C.10)$$



# D Selbstständigkeitserklärung

Ich, Nele Müller, versichere hiermit, dass ich meine Diplomarbeit mit dem Thema

*Untersuchungen zum Betriebsverhalten von Biomeiler*

selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe, wobei ich alle wörtlichen und sinngemäßen Zitate als solche gekennzeichnet habe. Die Arbeit wurde bisher keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch nicht veröffentlicht.

Dresden, den 23. November 2017

---

Nele Müller